XIII EDICIÓN

CONGRESO I+D+i

# CREANDO SINERGIAS

2 de Julio de 2026



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

UPV CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# XIII CONGRESO I+D+i CAMPUS D'ALCOI
# CREANDO SINERGIAS

## LIBRO DE ACTAS

**Escuela Politécnica Superior de Alcoy**

**Alcoy, 2 de julio de 2026**

ISBN: 979-13-990063-7-7

IMPRESIÓN: Compobell, S.L.

**Nota editorial**: Este libro de resúmenes se ha realizado con las contribuciones de cada autor. Las modificaciones realizadas no han supuesto ningún cambio del contenido científico de las aportaciones.

## Presidente comité organizador

Jorge Jordán Núñez

## Comité organizador

Hugo Blanes Giner
Amparo Jordá Vilaplana
Andreea Elena Fota Dochia
David Juárez Varón
Neus Garrido Sáez
Ruzana Galstyan Sargsyan
Óscar Trull Domínguez
Isaac Montava Belda
Juan Ivorra Martínez
José Vicente Tomás Miquel
Francisco Salas Molina

## Presidente comité científico

Daniel López Rodríguez

## Comité científico

Juan Seguí Moreno
Joaquin Jose Taverner Aparicio
Pablo Andrés Bernabeu Soler
Daniel García García
Luis Jesús Quiles Carrillo
Enrique José Sanchis Pacheco
Sergio García Carrasco
Miguel Jorge Reig Valor
Sergi Montava Jordá
Jaume Gómez Caturla
Iván Domínguez Candela
Alexis Lopez Borrell
Rosario Isabel Vilaplana Cerda
Sandra Oltra Crespo
Ana Isabel Pérez Molina
Barbara Micó Vicent
Vicente Jover Peris
David Peidro Payá
Ana Mengual Recuerda
Beatriz Andres Navarro
Carolina Rosario Blanes Nadal
Maria Rocio de la Torre Martinez

## PRÓLOGO

Este libro de actas recoge las contribuciones científicas presentadas en el XIII Congreso de I+D+i del Campus d'Alcoi, celebrado el 2 de julio de 2026 en la Escola Politècnica Superior d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València.

La principal finalidad de este congreso es crear un espacio de encuentro entre los distintos grupos de investigación del Campus d'Alcoi y los de otros campus y universidades. Favoreciendo el conocimiento mutuo, el intercambio de experiencias y la generación de nuevas colaboraciones interdisciplinarias. Estas sinergias constituyen un elemento clave para impulsar proyectos de investigación de mayor alcance, incrementar la transferencia de conocimiento y fortalecer la actividad científica desarrollada en nuestro campus.

En esta publicación se reúnen las comunicaciones orales y los pósteres científicos presentados durante la jornada, reflejando la diversidad temática, la calidad investigadora y el compromiso con la innovación de los grupos participantes. Los trabajos incluidos abarcan distintas áreas de conocimiento y muestran el esfuerzo conjunto de investigadores consolidados, jóvenes investigadores y estudiantes por generar conocimiento científico y tecnológico con impacto tanto académico como social.

Confiamos en que este libro de actas contribuya no solo a difundir los resultados de investigación presentados, sino también a fomentar nuevas oportunidades de colaboración entre investigadores y a consolidar este congreso como un foro de referencia para la promoción de la investigación, el desarrollo y la innovación.

# ÍNDICE

## CONFERENCIA PLENARIA

**PL01** *De residuo textil a biodegradación en suelo: una aproximación para evaluar el final de vida de los materiales textiles*.....3
Ainhoa Sánchez Martínez

## COMUNICACIONES ORALES

**CO01** *Resolución del despacho económico en sistemas eléctricos mediante el método de la función barrera*.....13
Christian Beleña Postigo

**CO02** *Procesado de Materiales Compuestos Basados en PET y Sales de Sodio con Potencial Aplicación en el Desarrollo de Dispositivos de Almacenamiento Energético* .....19
Ivan Dominguez-Candela; Jose Miguerl Ferri Azor; Alexis Lopez Borrell; Vicent Fombuena Borràs; Alfonso Martinez-Felipe

**CO03** *EDU4Plastic: Innovación frente al reto de los microplásticos en una economía circular y climáticamente neutra*.....25
Santiago Ferrandiz; Dana Perniu; Elena Cristina Rada; Anca Draguici; Anja Bubik

**CO04** *Fabricando soluciones a partir de un defecto: Estado del arte y aplicación industrial de las espumas metálicas* .....31
Tamara Aguilar; Santiago Ferrándiz; Mirko Kunowsky

**CO05** *Propuesta de una medida sintética de la estacionalidad turística: el caso de la Comunidad Valenciana.* .....37
Rafael Gómez Volpe; Francisco Salas Molina; Elena Pérez Bernabeu

**CO06** *Integración de indicadores técnicos, fundamentales y espaciales en un portal bursátil interactivo* .....43
Diego Deiros; Gaspar Mora; Angel Balaguer

**CO07** *Plataforma web basada en recuerdos personales para la estimulación cognitiva en personas con deterioro cognitivo leve* .....49
Mario Sanjuan-Canto; Isabel Ferri-Molla; Seraphina Fortunato; Jordi Linares-Pellicer

**CO08** *Fronteras digitales y derechos humanos: la protección de los migrantes en la era del algoritmo y de las nuevas tecnologías*.....55
Denis Cianconi

**CO09** *Volatilidad no estacionaria del mercado eléctrico español: análisis mediante modelo GARCH dinámico* .....61
David Veloso Castelló; Juan Carlos García Díaz

**CO10** *La personalidad juridica algorítmica* .....67
Manuel Gomez Morales

**CO11** *Realidad Aumentada e Inteligencia Artificial Multimodal para la Educación Asistida e Interactiva en la Infancia*.....73
Jordi Linares Carrasquer; Carlos Aliaga Torró; Juan Jesús Izquierdo Domenech; Joaquin José Taverner Aparicio

**CO12** *IA y conducción de vehículos: más cerca de lo que pensamos* .....79
Julio Esteban Rivero Jordá; Miguel Ángel Peydró Rasero; Sergio García Carrasco; Francisco de Paula Cerdá Leal

**CO13** *Ruta de simbiosis industrial para tableros reciclados de PolyAl y cáscara de arroz en aplicaciones de mobiliario urbano* .....85
Alba Loriente Luján

**CO14** *Cuando converger no basta: una comparación dinámica de métodos iterativos con y sin derivadas para ecuaciones no lineales con raíces complejas*.....91
Francisco I. Chicharro; Eva G. Villalba; Neus Garrido

**CO15** *Caracterización de Especies en Lías de Vino tras su Fraccionamiento mediante Ultrafiltración*.....97
Miguel-Jorge Reig-Valor; Maya Torregrosa-Sánchez; J.M. Ferri; Maria-Fernanda López-Pérez

**CO16** *Fermentación de Caqui para el Desarrollo de un Ingrediente Multifuncional con Beneficios para la Salud Dérmica y Actividad Fotoprotectora* .....103
Cristina Guillem Moral

**CO17** **A***plicación del neuromarketing en el lanzamiento y promoción de videojuegos: caso de estudio de "interactive design 2m.j.n."*.....109
David Juárez Varón; Marlon Jared Ospina Ochoa; Shirley Andrea Henao Galindo; Maria José Gaviria

**CO18** *Descarga de tareas en Aplicaciones AIoT.* .....115
Jorge Zafrilla Muñoz; Javier Silvestre Blanes; Teresa Albero Albero

**CO19** *Desarrollo de materiales sostenibles con funcionalidad antioxidante mediante valorización de residuos vegetales* .....121
Juan Ivorra Martínez; Carlos Lázaro Hernandez; Octavio Fenollar Gimeno; David García Sanoguera

**CO20** *Experiencia de compra en entornos de moda rápida. Análisis del impacto del exceso de productos y del servicio al cliente en la experiencia de compra mediante neuromarketing*.....127
Juan Camilo Serna-Zuluaga; Karen Stefanny Leon Pabon; Jennyfer Amado Bermúdez; Camilo Vera

**CO21** **A***nálisis de la experiencia de usuario en la apertura de cuenta online en entidades bancarias* .....133
Stephanie Ponce-Torres; Maira Alejandra Moreno Domínguez; Laura Tatiana Luna Briñez; Ramon Eduardo Guacaneme Pineda

**CO22** *Piedras viajeras: inteligencia artificial y arqueometría no destructiva al servicio del estudio de rede4s prehistóricas de intercambio* .....139
Joaquín Jiménez-Puerto; Óscar Trull-Domínguez; Gianni Gallello

**CO23** *Aplicación de Sistemas WAIV en Estrategias de Descarga Cero de Líquidos para Tratamiento de Salmueras de Aguas Salobres* .....145
Alexis López Borrell; Irene Boronat Castellar; Salvador Cayetano Cardona Navarrete; Maria Fernanda López Pérez

**CO24** *Valorización de la Algarroba Mediante la Recuperación de Polifenoles con Membranas de UF Regeneradas* .....151
Maya Torregrosa Sánchez; Jaime Lora García; Salvador C. Cardona Navarrete; Maria Fernanda López Pérez

**CO25** *Modelos de ARIMA doble estacional para la predicción en el sector eléctrico* .....157
Oscar Trull; Juan Carlos García-Díaz; Angel Peiró Signes; Marival Segarra Oña

**CO26** *La problemática emergente del final de vida de las palas eólicas*.....163
Inmaculada Climent Fuentes; Sergi Montava Jordà; Julio Esteban Rivero Jordá; Bernardo Antonio Oliver Borrachero

**CO27** *Fabricación aditiva sostenible aplicada a prototipos eólicos: procedimiento de limpieza y recuperación de boquillas FDM* .....169
Alejandro De La Calle Salas; Sergi Montava Jorda; Inmaculada Climent Fuentes; Francisco José Parres García

**CO28** *Comparación de la experiencia de compra física y digital en tienda deportiva monomarca: implicaciones para la satisfacción y fidelización del consumidor*.....175
Alejandro Rodríguez Blasco; Andrés Felipe Yumayusa Castro; María Juliana Guitiérrez Zuñiga; Esther Mondéjar Verdú

**CO29** *Viabilidad de la decoloración con ozono en residuos de denim y su efecto en la calidad de la fibra reciclada* .....181
Cristina Mira Cuenca; Sliman Almuhamed; Bàrbara Micó Vicent; Daniel López Rodríguez; Jorge Jordán Nuñez

**CO30** *Circularidad Total Fibra a Fibra en el Sector Textil a Través de Nuevas Tecnologías de Reciclaje de Poliéster*.....187
Concha Silvestre; Javier Pascual; Simona Moldovan

**CO31** *Aplicación del marco Safe and Sustainable by Design (SSbD) al desarrollo de sistemas avanzados de filtración de aire basados en nanofibras: caso de estudio del proyecto INTEGRANO* .....193
Bruno Marco Barrachina; Carlos Pascual Miró; Alicia Romero Mira; Emma Pérez Hernández; Maria Blanes Company

**CO32** *Percepción y prácticas de seguridad en laboratorios universitarios de química* .....199
María F. Cuenca Lozano

**CO33** *Compuestos de PLA de alto contenido en lignina plastificados con acetato de eugenilo para materiales basados en economía circular*.....205
David Barrera-Juca; Jordi Silvestre; Jaume Gomez-Caturla; Rafael Balart

**CO34** *Pensar en capas: transferencia del razonamiento estratigráfico arqueológico al aprendizaje activo en grados de Ingeniería mediante entornos digitales inmersivos* .....211
Joaquín Jiménez-Puerto; Blanca Pérez-Aguilar; María Alfonso Molina

**CO35** *Comportamiento térmico de un bioplástico a base de zeína reforzada con nanotubos de haloisita*.....217
Jorge Israel Peñafiel Alvarado; Teodomiro Boronat Vitoria; Octavio Ángel Fenollar Gimeno; Rafael Antonio Balart Gimeno

**CO36** *Comunicación Integral y Multicanal: El Poder del 'Boca-Oreja' frente a la Saturación Digital en la Promoción de Estudiantes del Campus de Alcoy* .....223
Jose Mengual Vañó; Ignacio Lara Jornet; Rubén Lledó Nontava

**CO37** *Reducción de la migración global en PLA plastificado con ésteres dibutílicos mediante extrusión reactiva*.....229
Maria del Puig Vicente Viñas; David Barrera Juca; Néstor Montañés Muñoz; Daniel García García

**CO38** *Optimización de la producción en Industria 4.0: planificación dinámica basada en el estado de las máquinas* .....235
Lucía Agud Albesa; Neus Garrido Saez; Daniel López Rodríguez; Sandra Oltra Crespo; Ángel A. Juan

**CO39** *Impacto de IA Generativa en Educación Secundaria: meta-revisión sistemática y aproximación cualitativa*.....241
María Alfonso-Molina; Joaquín Rafael Jiménez Puerto; Blanca Natividad Pérez Aguilar

**CO40** *Investigación de atributos críticos de la materia prima: influencia del color y procesos previos de tintura* .....247
Sabela Otero Camaño; Marta Fabra Regalado; Jorge Jordán Nuñez; Bárbara Micó Vicent; Daniel López Rodríguez

**CO41** *La teoría de grafos en contexto: uso de redes reales en el aula* .....253
Alejandro Inza Fitó; Daniel López Rodríguez; Marc Martí Sabaté; Andrés Cremades Botella

**CO42** *Diseño experimental de un estudio intercomparativo para la medición de estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente* .....259
Marta Fabra Regalado; Sabela Otero Camaño; Jorge Jordán Núñez; Daniel López Rodriguez; Bàrbara Micó Vicent

**CO43** *Más allá del aula: Desarrollo de los resultados de aprendizaje mediante metodología sistémica en la formación profesional de comercio y marketing en el IES Cotes Baixes* .....265
Carolina Rosario Blanes Nadal

**CO44** *Escuchar para captar: encuesta de nuevo ingreso y planificación comunicativa universitaria. El caso del Campus d'Alcoi de la UPV* .....271
Ignacio Lara Jornet; Rubén Lledó Montava; José Mengual Vañó

**CO45** *Propiedades mecánicas y de compostabilidad de biopolímeros de pectina obtenidos mediante extrusión e inyección* .....277
Jordi Silvestre Botella; Jorge Peñafiel Alvarado; Lourdes Sánchez Nacher; Luis Jesus Quiles Carrillo

**CO46** *Diseño inverso de andamios TPMS de hidroxiapatita para ingeniería tisular mediante aprendizaje automático*.....283
Carlos Mauricio Sánchez Alvarracín; Santiago Ferrandiz Bou; Christian Mauricio Cobos Maldonado

**CO47** *Transformando la experiencia de usuario en la app de una empresa de moda: un enfoque desde la salud mental y las imágenes de moda*.....289
Melanie Esther Pedraza León; Shirley Andrea Henao Galindo; Ana Mengual-Recuerda

**CO48** *Investigación computacional de microagujas polimerizadas por dos fotones para estudios de desgaste de biomateriales a microescala* .....295
Georgina Sebastiá Blanes; Elena Pinilla Cienfuegos,; Laura Mercadé Morales

**CO49** *Modelado multicomponente de la eyección y combustión de gases de venteo por fuga térmica para el diseño de sistemas de transporte de baterías de ion-litio*.....301
José Da Silva; Javier Marco-Gimeno; Cesar Carvallo; José Vicente Pastor

**CO50** *Mantenimiento por condición: estimación de la fiabilidad de equipos monitorizados* .....307
Enrique Navarro Ponce; Isabel Martón Lluch; Ana Isabel Sánchez Galdón; Sebastián Salvador Martorell Alsina

**CO51** *Una revisión unificada de la seguridad en IA: aprendizaje automático adversario, grandes modelos de lenguaje y amenazas cloud-native en Kubernetes* .....313
Waqas Ali; Antonio Molina Picó; Juan Seguí Moreno

**CO52** *Herramientas para la evaluación del efecto del $H_2$ sobre la reactividad en sistemas de postratamiento de emisiones* .....319
Sebastian Noriega Martinez; Joaquín de la Morena Borja; Enrique José Sanchis Pacheco; Pedro Piqueras Cabrera

**CO53** *Estudio de la distribución local de corriente y agotamiento de oxígeno en PEMFCs mediante modelado de orden reducido*.....325
José Andrés Lalangui Gallegos; Joaquín de la Morena Borja; Enrique José Sanchis Pacheco; Pedro Piqueras Cabrera

**CO54** *Estado del arte: Barreras en la adopción del algodón reciclado mecánicamente* .....331
Cristina Mira-Cuenca; Sliman Aalmuhamed; Bàrbara Micó-Vicent; Daniel López-Rodriguez; Jorge Jordán-Núñez

**CO55** *Modelo de madurez institucional para la planificación estratégica en entornos universitarios inclusivos* .....337
Rocio de la Torre; Ana Mengual-Recuerda; Lina E. Valencia

**CO56** *La mirada como mecanismo de orientación atencional: un análisis mediante eye-tracking*.....341
Ana Mengual-Recuerda; David Juárez-Varón; Beatriz Andres; Andreea Fota

**CO57** *Síntesis verde de Carbon Dots a partir de residuo de café: efecto del ligando en sus propiedades* .....347
Raúl Navarro Martínez; Laura Francés Soriano; Ana María Amat Payá; Antonio Arqués Sanz

**CO58** *Protocolo metodológico para la selección de variables e indicadores compuestos en el estudio de la cocreación y ecoinnovación empresarial basado en PITEC 2016* .....353
Gómez Palacios, César; Peiró-Signes, Ángel; Trull Domínguez, Óscar

**CO59** *Evaluación heurística de un entorno virtual de aprendizaje: estudio de caso en PoliformaT*.....359
Evaluación heurística de un entorno virtual de aprendizaje: estudio de caso en PoliformaT; Silvia Sempere Ripoll; Jordi Virgili Gomà

**CO60** *Aplicación del Pallet Building Problem a la optimización de rutas de picking* .....365
Ignacio Jordá Mora; Neus Garrido; Angel A. Juan

**CO61** *Realidad virtual (RV) adaptativa para autismo (TEA): diagnóstico mediante agente conversacional (IA) y creación automática de escenarios* .....371
Aitana Francés Falip; J.Ernesto Solanes Galbis

**CO62** *Producción fotocatalítica de hidrógeno con luz solar simulada a partir de disoluciones acuosas de glicerol utilizando materiales basados en UiO-66(Zr)*.....377
Ana Athenea Tejedor García; Celia M. Rueda Navarro; Belén Ferrer Ribera; Hermenegildo García Baldoví; Sergio Navalón Oltra

**CO63** *Evaluación Mecánica de un Material Compuesto Funcional Basado en Componentes Activos de Cannabis Sativa*.....383
Irene Boronat Castellar

**CO64** *Cálculo simultáneo de raíces múltiples mediante esquemas iterativos sin derivadas y tipo Ehrlich* .....389
Francisco Israel Chicharro Lopez; Neus Garrido Saez; Julissa Hermelinda Jerezano Ulloa

**CO65** *Gemelos digitales en el sector cerámico: análisis del stand virtual* .....395
Vicente Jover Peris; Jorge Jordán Nuñez

## COMUNICACIONES EN PÓSTER

**CP01** *Nuevas cartografías eco-sociales: hacia una ecoestética crítica en los Parques Naturales de la Península Ibérica* .....403
Nieves de Montserrat García Botella

**CP02** *Propiedades elásticas de $CdCrO_4$ bajo presión implicaciones en la estabilidad estructural*.....409
Rosario Vilaplana; Alfonso Muñoz; Constantin Popescu; Daniel Errandonea

**CP03** *Mezclas termoplásticas de zeína/dextrano plastificadas con dietilenglicol para envases sostenibles* .....415
Jaume Gómez Caturla; David García Sanoguera; Lourdes Sánchez Nacher; Juan Ivorra Martínez

**CP04** *Datos abiertos procedentes de la agricultura familiar y comunitaria: los patios productivos AGROHUB* .....421
Antonia Ferrer Sapena; Pedro Fernández de Córdoba; Fernanda Peset; Antonio Martínez Lengua

**CP05** *Valorización de PET multicapa reciclado mediante incorporación de LDPE reciclado* .....427

Aritz Unamuno Garay; Fernando Galera Perez; Ana Ibáñez García; Asunción Martínez García; María Dolores Samper

**CP06** *Efecto de la incorporación de PHA en el comportamiento del PLA* .....433
Alexandra Llidó Barragán; Aritz Unamuno Garay; Juan López Martínez; Cristina Pavón

**CP07** *Efecto del tratamiento de tejidos de algodón con extractos de pulpa de café sobre el factor de protección ultravioleta.* .....439
Andrea Corina Vidurrizaga Hassinger

**CP08** *Newton-type methods in quantum computing* .....445
Alicia Cordero; Juan R. Torregrosa

**CP09** *Finding Simultaneous Solutions of Nonlinear Problems* .....451
Juan R. Torregrosa; Alicia Cordero; Paula Triguero Navarro; Neus Garrido

**CP10** *Clasificación de Señales Biométrica Mejorada Combinando Slope Entropy y Downsampling* .....457
Vicent Moltó Gallego

**CP11** *Estrategias y aplicaciones prácticas de 'prompting' en la comunicación de campus universitarios periféricos* .....463
José Mengual Vaño; Ignacio Lara Jornet; Rubén Lledó Montava

**CP12** *Del bagazo cervecero a materiales circulares: planta piloto para la valorización secuencial dentro del proyecto CIRCSYST* .....469
M. del Puig Vicente-Vinas; Néstor Montañés; Mario Miranda-Pinzon; Luis Quiles-Carrillo

**CP13** *Evaluación de la ventana de procesabilidad en impresión 3D mediante la caracterización reológica de biocompuestos basados en PLA* .....475
Harrison de la Rosa Ramírez; Judith Boronat Soler; Fabricio Calderón Jiménez; Santiago Ferrándiz Bou

**CP14** *Metodología experimental para la evaluación del coeficiente de Poisson en un textil elástico con geometría auxética cortada por láser* .....481
María Pérez Ripoll

**CP15** *Realización de espectros para un patrón de ceros de orden 3* .....487
Macarena Boix García; Lucía Agud Albesa; Daniel López Rodríguez

**CP16** *Efecto de la zeína plastificada sobre la respuesta mecánica y la morfología de fractura de mezclas de PLA procesadas por inyección*.....493
Carlos Lázaro Hernández; Daniel García García; Mario Nicolás Miranda Pinzón; Teodomiro Boronat Vitoria

**CP17** *Plataforma de virtualización Proxmox con GNS3 como entorno de aprendizaje en asignaturas de Redes de Computadores*.....499
Raúl Llinares Llopis; Josué Ferri Pascual; Daniel López Rodríguez; Andrés Camacho García; Jorge Igual García

**CP18** *Prototipado digital 3D. Metodología de medición sobre gemelos digitales* .....505
Rafaela Morales Morales; Raquel Macias Gonzàlez

**CP19** *Films biodegradables de PLA reciclado/TPS a partir de residuos de impresión 3D: optimización del procesado y aplicaciones potenciales como matrices para quantum dots* .....511
Fabricio Calderón; Harrison de la Rosa Ramirez; Juan López Martínez; Cristina Pavón

**CP20** *Investigación de Sinergias en Mezclas de SLS+LDAO para Reducir la Irritación Dérmica y Aumentar la Eficacia* .....517
Elena Herrero; Cristina Calabuig; Marilés Bonet Aracil

**CP21** *SUBBIMATT: Materiales sostenibles, de base biológica y bioinspirados para textiles técnicos inteligentes* .....523
Óscar Calvo; Bruno Marco; Carlos Pascual; Víctor Herraez; Álvaro Alemany

**CP22** *Enfoque cuantitativo integrado para la implementación del marco Safe and Sustainable by Design (SSbD) en nanomateriales: metodología y aplicación en el proyecto INTEGRANO.* .....529
Bruno Marco; Carlos Pascual; Alicia Romero; Emma Perez; María Blanes

**CP23** *Desarrollo de un algoritmo en Python para el stitching de imágenes topográficas de interferometría óptica* .....535
Víctor Domingo Arlandis; Samuel Sánchez Caballero; Miguel Ángel Sellés Cantó; Bernardo Antonio Oliver Borrachero

**CP24** *Microscopía electrónica de barrido como herramienta cualitativa para la caracterización morfológica de fibras de algodón reciclado mecánicamente*.....541
Marta Fabra Regalado; Sabela Otero Camaño,; Jorge Jordán Núñez; Daniel López Rodriguez; Bàrbara Micó Vicent

**CP25** *Modelo de gemelo digital AgroHub para la gestión agroclimática en sistemas de Agricultura Campesina, Indígena, Familiar y Comunitaria del Caribe colombiano* .....547
Antonio J. Martínez Lengua; John A. Taborda Giraldo; Antonia Ferrer Sapena; Fernanda Peset; Pedro José Fernández de Córdoba Castellá

**CP26** **D***esarrollo de una máquina de ensayos de fluencia asistido por agentes de inteligencia artificial* .....553
Sergio García Carrasco; Beatriz Eixerés Tomás; Víctor Domingo Arlandis; Francisco de Paula Cerdà Leal

**CP27** *Diseño experimental para la identificación de variables críticas de tejidos y la calidad de fibras de algodón recicladas* .....559
Sabela Otero Camaño; Marta Fabra Regalado; Jorge Jordan Nuñez; Barbara Mico Vicent; Daniel López Rodríguez

**CP28** *Paralelismo e inteligencia artificial: acelerando el análisis de señales temporales* .....565
Juan Seguí Moreno; Antonio Molina Picó; Ali Waqas

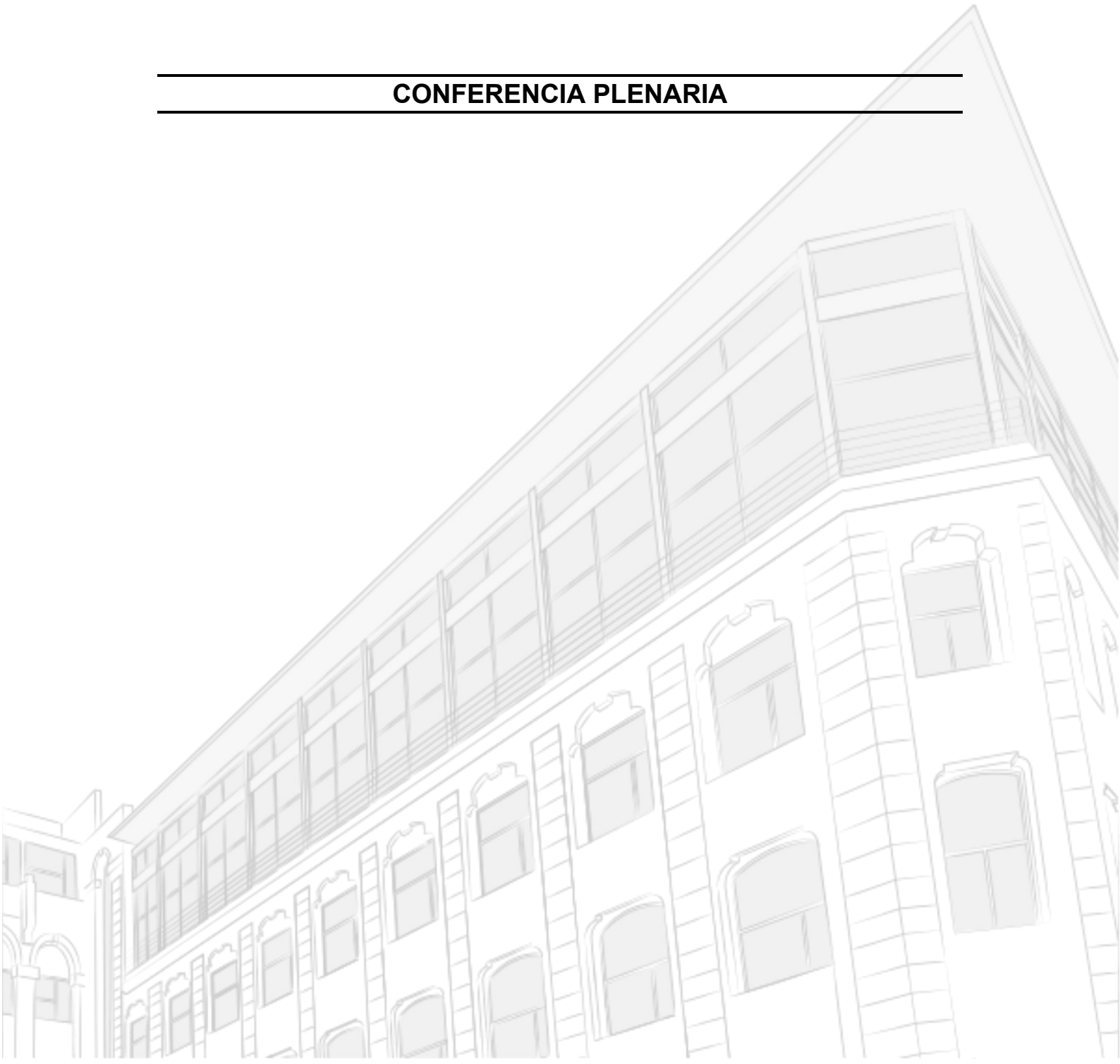
**CP29** *Influencia del proceso de maceración en las propiedades de colorante extraído del fruto del caqui*.....571
Víctor Herráez Aparicio; Cristina Guillem Moral; Ignacio Monllor Carbonell; María Blances Company; Eva Bou Belda

**CP30** *Influencia del tratamiento térmico de la haloisita en la adsorción de C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL*.....577
Teresa Rutschi-De-Cea; María Jesús García-Campo; Daniel López-Rodríguez; Bàrbara Micó-Vicent

## COMUNICACIONES ORALES ADICIONALES

**CO66** *Validación CAD–CAE de una autoparte mediante refuerzo localizado con fibra corta en impresión 3D FFF: identificación de zona crítica y uso selectivo de material de altas prestaciones* .....585
Peralta-Zurita, Diana-Belén, Ferrándiz-Bou, Santiago, Cobos Maldonado, Christian

# CONFERENCIA PLENARIA



# De residuo textil a biodegradación en suelo: una aproximación para evaluar el final de vida de los materiales textiles

**Ainhoa Sánchez Martínez**

*Grupo de Investigación Gestión Integral en la Industria Textil del Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España.*

*aisanma1@epsa.upv.es*

## RESUMEN

El incremento de los residuos textiles y las limitaciones de los sistemas actuales de gestión han impulsado la búsqueda de estrategias más sostenibles para el final de vida de los materiales. En este contexto, la biodegradabilidad en suelo puede representar una alternativa de interés para determinados textiles; sin embargo, su evaluación sigue siendo compleja debido a la ausencia de metodologías específicas adaptadas a la naturaleza fibrosa, porosa y procesada de estos materiales.

Este trabajo plantea el algodón como material modelo para desarrollar una aproximación integral de evaluación de la biodegradabilidad textil en suelo. Para ello, se integran resultados representativos centrados en cuatro aspectos complementarios: el establecimiento de un método respirométrico de medición, basado en la cuantificación de $CO_2$; el análisis de la influencia de condiciones ambientales como temperatura, pH y humedad; el estudio del efecto del procesado textil mediante tintura; y la evaluación estructural de la fracción residual sólida mediante microtomografía de rayos X, con el fin de complementar la información respirométrica.

Los resultados muestran que la biodegradabilidad del algodón en suelo no debe interpretarse como una propiedad fija de la fibra, sino como un proceso condicionado por el medio, el procesado y la evolución estructural del material.

**Palabras clave:** biodegradabilidad; textil; algodón; suelo; respirometría; final de vida.

## INTRODUCCIÓN

La industria textil constituye uno de los sectores con mayor impacto ambiental debido al elevado consumo de recursos, el uso de agua y productos químicos, la generación de emisiones y la acumulación creciente de residuos al final de la vida útil de los productos [1]. El aumento del consumo textil y la reducción de los ciclos de uso han intensificado la generación de residuos posconsumo, poniendo de manifiesto las limitaciones de los sistemas actuales de recogida, clasificación, reutilización y reciclaje [1,2]. Además, los productos textiles presentan una elevada heterogeneidad, ya que pueden estar formados por diferentes fibras, mezclas, colorantes, acabados y tratamientos funcionales que condicionan tanto su reciclabilidad como su comportamiento ambiental [2,3].

El reciclaje constituye una estrategia prioritaria dentro de la economía circular; sin embargo, no todos los residuos textiles pueden reciclarse de forma indefinida ni conservar propiedades equivalentes a las del material original [3,4]. La pérdida progresiva de calidad, la heterogeneidad de las fracciones recogidas y la presencia de mezclas íntimas de fibras hacen que una parte de los residuos textiles requiera aproximaciones complementarias de gestión [4,5]. En este contexto, la

biodegradabilidad en suelo adquiere interés para determinados materiales, especialmente cuando se trata de fibras naturales, polímeros biobasados o productos textiles diseñados para aplicaciones donde la liberación o permanencia en el medio puede ser relevante [5].

La biodegradación se define como el proceso mediante el cual un material orgánico es transformado por la acción de microorganismos, como bacterias y hongos, en compuestos más simples. En condiciones aerobias, este proceso implica la conversión progresiva del carbono del material en $CO_2$, agua, biomasa microbiana y otros productos metabólicos [6].

Sin embargo, actualmente no existen normas específicas ampliamente consolidadas para evaluar la biodegradabilidad en suelo de materiales textiles. En muchos casos se recurre a metodologías desarrolladas para otros materiales, especialmente plásticos, aunque estos difieren de los textiles en aspectos clave como la estructura fibrosa, la porosidad, la arquitectura del tejido, la presencia de mezclas de fibras y los tratamientos químicos aplicados durante el procesado [7-10]. Esta falta de metodologías específicas dificulta la obtención de datos comparables y puede conducir a interpretaciones simplificadas del comportamiento real de los textiles al final de su vida útil.

Además, la sostenibilidad de los materiales textiles se evalúa con frecuencia a partir de aproximaciones centradas principalmente en la fibra base, sin considerar suficientemente el efecto de la estructura textil, el procesado industrial, los colorantes, los acabados o las funcionalidades incorporadas. Esta simplificación puede afectar tanto a la interpretación de los ensayos de biodegradabilidad como a estudios de análisis de ciclo de vida, en los que el comportamiento ambiental del producto final puede diferir del atribuido únicamente a su composición fibrosa [2,5].

Por ello, el desarrollo de metodologías específicas para evaluar la biodegradabilidad de materiales textiles en suelo permitiría generar datos más específicos y realistas sobre el comportamiento ambiental de los textiles, contribuyendo a una evaluación más rigurosa de su contaminación potencial y a la elaboración de análisis de ciclo de vida más representativos.

## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para la evaluación de la biodegradabilidad de materiales textiles en suelo, empleando el algodón como material modelo. La aproximación propuesta combina la medición respirométrica de la mineralización, mediante la cuantificación de $CO_2$ y el cálculo del porcentaje de biodegradación final, con el análisis de las condiciones de ensayo, el efecto del procesado textil y la caracterización estructural de la fracción residual sólida. De este modo, se plantea una metodología orientada a evaluar el comportamiento del material textil en suelo de forma más específica y representativa que las aproximaciones basadas únicamente en la fibra de partida.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El algodón se seleccionó como material modelo para el desarrollo de una metodología de evaluación de la biodegradabilidad textil en suelo, debido a su composición celulósica, su amplio uso en el sector textil y su comportamiento biodegradable esperado. Se emplearon muestras de algodón sin tratar para el establecimiento del

método respirométrico y el estudio de las condiciones de ensayo, así como las mismas muestras de algodón pero tintadas para evaluar el efecto del procesado textil sobre la biodegradación.

La biodegradabilidad se evaluó mediante un sistema respirométrico basado en la incubación controlada de muestras textiles en suelo. El montaje experimental consistió en reactores cerrados donde se simula un ecosistema que contenía suelo y muestra textil, junto con un sistema de captura del $CO_2$ generado durante la actividad microbiana (Figura 1). Paralelamente, se emplearon reactores blanco, constituidos únicamente por suelo, para corregir la respiración endógena del medio. El $CO_2$ producido durante el ensayo se cuantificó periódicamente y se utilizó como indicador de la mineralización microbiana del carbono orgánico presente en el algodón. A partir del $CO_2$ atribuible a la muestra, corregido con los blancos de suelo, y del contenido de carbono del material, se calculó el porcentaje de biodegradación final o mineralización.



**Figura 1.** Esquema del montaje respirométrico empleado para la evaluación de la biodegradabilidad textil en suelo.

Una vez definido el método, se evaluó la influencia de condiciones abióticas del suelo, concretamente temperatura, pH y humedad, sobre la respuesta respirométrica del algodón. Para ello, se seleccionaron valores representativos de condiciones habituales de ensayo en suelo, con el objetivo de analizar la sensibilidad del proceso de mineralización frente a las variaciones del medio.

Para evaluar el efecto del procesado textil, se estudió algodón tintado y se comparó con algodón sin tintar. El proceso de tintura se realizó empleando el colorante Azul Índigo VAT Blue 1 (C.I. 73000) al 2% s.p.f, seleccionado como colorante representativo de aplicación textil sobre algodón. Esta comparación permitió analizar si un proceso convencional como la tintura puede modificar la respuesta biodegradable de una fibra celulósica, al alterar potencialmente la superficie del material, su interacción con el agua o su accesibilidad a la microbiota del suelo.

La evaluación respirométrica se complementó con el análisis de la fracción residual sólida mediante microtomografía de rayos X (micro-CT). Para ello, se emplearon

reactores de menor tamaño, diseñados para ser compatibles con las dimensiones del equipo Zeiss Xradia 620 Versa system de micro-CT. Estos reactores se prepararon a escala respecto al montaje respirométrico descrito en la Figura 1, manteniendo la misma configuración general de suelo y muestra textil, pero sin incorporar la trampa de KOH utilizada para la captura de $CO_2$. Esta técnica permitió estudiar de forma no destructiva, y sin alterar el ecosistema de modo que el análisis puede seguir su curso sin alteraciones, la estructura del algodón remanente tras la exposición al suelo, aportando información sobre el deterioro físico, la pérdida de continuidad estructural y la permanencia de material sólido. Las imágenes obtenidas mediante micro-CT fueron reconstruidas y analizadas empleando el software Dragonfly, que permitió observar la evolución estructural del material residual y complementar la información obtenida mediante la producción de $CO_2$.

Los resultados se interpretaron de forma integrada para relacionar la mineralización del algodón con las condiciones del ensayo, el efecto del procesado textil y la evolución estructural de la fracción residual sólida. La descripción detallada de los procedimientos experimentales y del tratamiento estadístico se recoge en las publicaciones originales [11-13]; en este trabajo se seleccionan resultados representativos y se reinterpretan de forma integrada con el objetivo de presentar una metodología de evaluación del final de vida textil en suelo basada en el algodón como material modelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Establecimiento del método y sensibilidad frente a las condiciones de ensayo

El establecimiento del método respirométrico prolongado en el tiempo, permitió cuantificar la biodegradación del algodón en suelo a partir de la producción acumulada de $CO_2$. Esta aproximación proporciona un indicador directo de la mineralización microbiana del carbono orgánico del material, lo que resulta especialmente relevante en el caso de los textiles, donde la pérdida de masa o el deterioro visual pueden no ser suficientes para describir el proceso de biodegradación.

Una vez definido el procedimiento de medición, se evaluó la influencia de las condiciones abióticas del suelo sobre la mineralización del algodón. Para ello, se seleccionaron tres condiciones representativas (favorable, intermedia y limitante) con el objetivo de visualizar la sensibilidad del método frente a variaciones del medio de ensayo. Como se observa en la Figura 2, la evolución respirométrica del algodón varió notablemente en función de la temperatura, el pH y la humedad aplicados. La condición favorable presentó la mayor producción acumulada de $CO_2$, indicando una mayor mineralización del material, mientras que la condición limitante redujo claramente la respuesta respirométrica.

Estos resultados confirman que la biodegradabilidad observada no depende únicamente de la naturaleza celulósica del algodón, sino también de las condiciones del medio en el que se desarrolla el ensayo. Parámetros como temperatura, pH y humedad que se pueden encontrar en el sustrato, condicionan la actividad microbiana del suelo y, en consecuencia, la velocidad y extensión de la mineralización. Por tanto, la selección justificada y el control de las condiciones de ensayo constituyen requisitos fundamentales para obtener datos comparables y evitar interpretaciones erróneas sobre el potencial biodegradable de los textiles, además es destacable que, el control de dichas condiciones, puede favorecer la degradación de estos materiales.

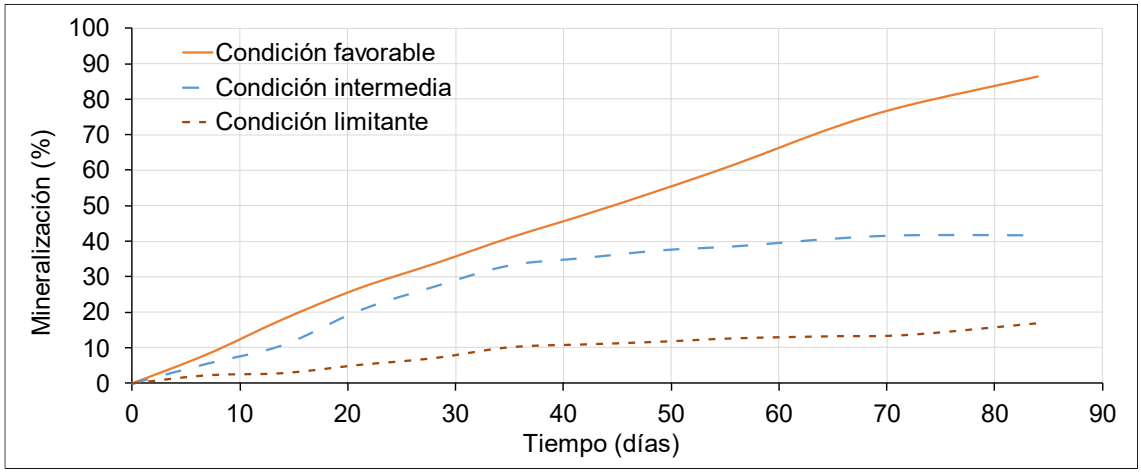



**Figura 2.** Evolución respirométrica del algodón bajo una condición favorable, una condición intermedia y una condición limitante de ensayo. Condición favorable: 60°C, pH 7,5, humedad 60 %; condición intermedia: 25 °C, pH 7,5, humedad 40 %; condición limitante: 25 °C, pH 6,0, humedad 40 %. Elaboración propia a partir de datos publicados en [12].

## Efecto de la tintura sobre la biodegradación del algodón

Tras validar la sensibilidad del método frente a las condiciones del medio, se analizó la influencia de alguna etapa del procesado textil utilizando la condición favorable de biodegradación. Para ello, se comparó la respuesta respirométrica del algodón sin tintar con la del algodón tintado con Azul Índigo VAT Blue 1 (C.I. 73000). La incorporación de esta etapa permitió aproximar la evaluación a un material textil más representativo del producto final, ya que el algodón empleado en aplicaciones comerciales suele estar sometido a procesos de tintura, acabado o modificación superficial.

Los resultados (Figura 3) mostraron que el algodón tintado presentó una biodegradación superior a la del algodón sin tintar, evidenciando que el procesado textil puede modificar la respuesta biodegradable de la fibra celulósica. Este comportamiento indica que la biodegradabilidad no debe atribuirse únicamente a la naturaleza de la fibra base, sino que debe evaluarse considerando el material textil procesado. En este caso, la mayor mineralización observada podría estar relacionada con las condiciones del proceso de tintura con colorante vat, que implica etapas redox y tratamientos alcalinos capaces de modificar parcialmente la superficie de la celulosa. Estas modificaciones podrían favorecer la humectabilidad, la accesibilidad del sustrato o la colonización microbiana, incrementando la respuesta respirométrica.

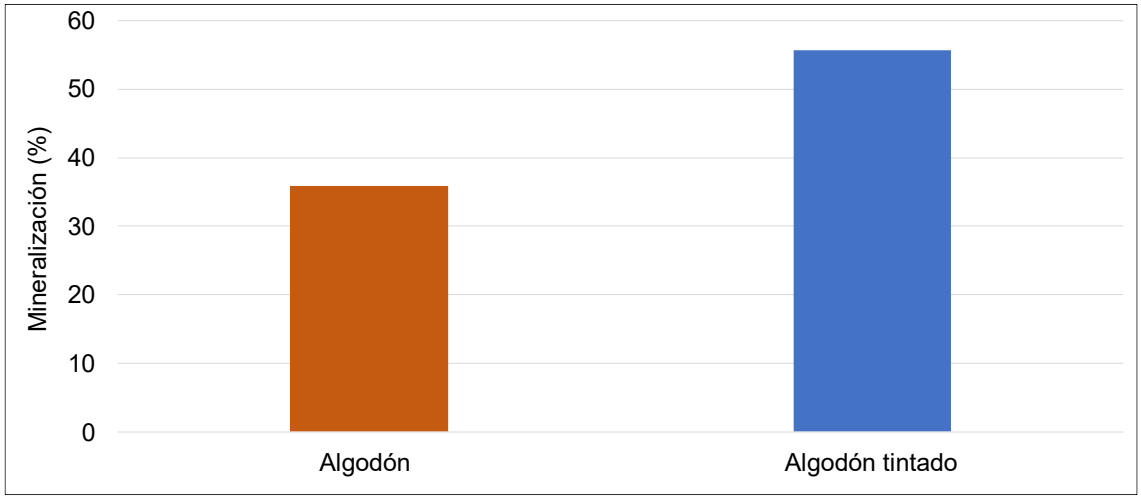



**Figura 3.** Comparación representativa de la biodegradación del algodón sin tintar y algodón tintado. Elaboración propia a partir de datos publicados en [13].

### Evaluación estructural del residuo sólido

La microtomografía de rayos X permitió caracterizar la fracción sólida residual atribuible al material no biodegradado, proporcionando información tridimensional sobre su volumen, morfología y continuidad estructural. Esta información complementa la respirometría, ya que mientras la producción de $CO_2$ cuantifica la fracción mineralizada del carbono orgánico, la micro-CT permite evaluar la fracción del material que permanece físicamente en el suelo tras el ensayo.

Como se observa en la Figura 4, antes del ensayo el tejido presenta una estructura continua y definida, mientras que tras la biodegradación se evidencia una pérdida importante de integridad física, con fragmentación del material y alteración de la arquitectura textil. A pesar de la elevada degradación observada, el análisis de la fracción residual mostró la permanencia de aproximadamente un 16 % de masa no biodegradada, lo que confirma que la mineralización cuantificada por $CO_2$ debe interpretarse junto con la evaluación del material sólido remanente.

## CONCLUSIONES

En conclusión, la metodología propuesta permite evaluar la biodegradabilidad del algodón en suelo de forma integrada, aportando una base útil para el estudio de otros materiales textiles y para la generación de datos más realistas aplicables a análisis ambientales y de ciclo de vida.

La respirometría se confirmó como una herramienta adecuada para cuantificar la mineralización del carbono orgánico del material textil mediante la producción de $CO_2$. No obstante, la respuesta respirométrica depende tanto de la naturaleza del material como de la actividad microbiana del suelo, condicionada por variables ambientales como la temperatura, el pH y la humedad. Por ello, el control de las condiciones de ensayo resulta esencial para obtener datos comparables y reproducibles.

El análisis del algodón tintado puso de manifiesto que los procesos textiles convencionales pueden modificar el comportamiento biodegradable de una fibra natural. En consecuencia, la evaluación de la biodegradabilidad debe realizarse sobre materiales representativos del producto final y no únicamente sobre sustratos sin tratar o fibras de partida.

La microtomografía de rayos X permitió complementar la información respirométrica mediante la evaluación tridimensional de la fracción sólida residual, ya que permite diferenciar entre la fracción del material transformada biológicamente y la fracción que permanece físicamente en el suelo.

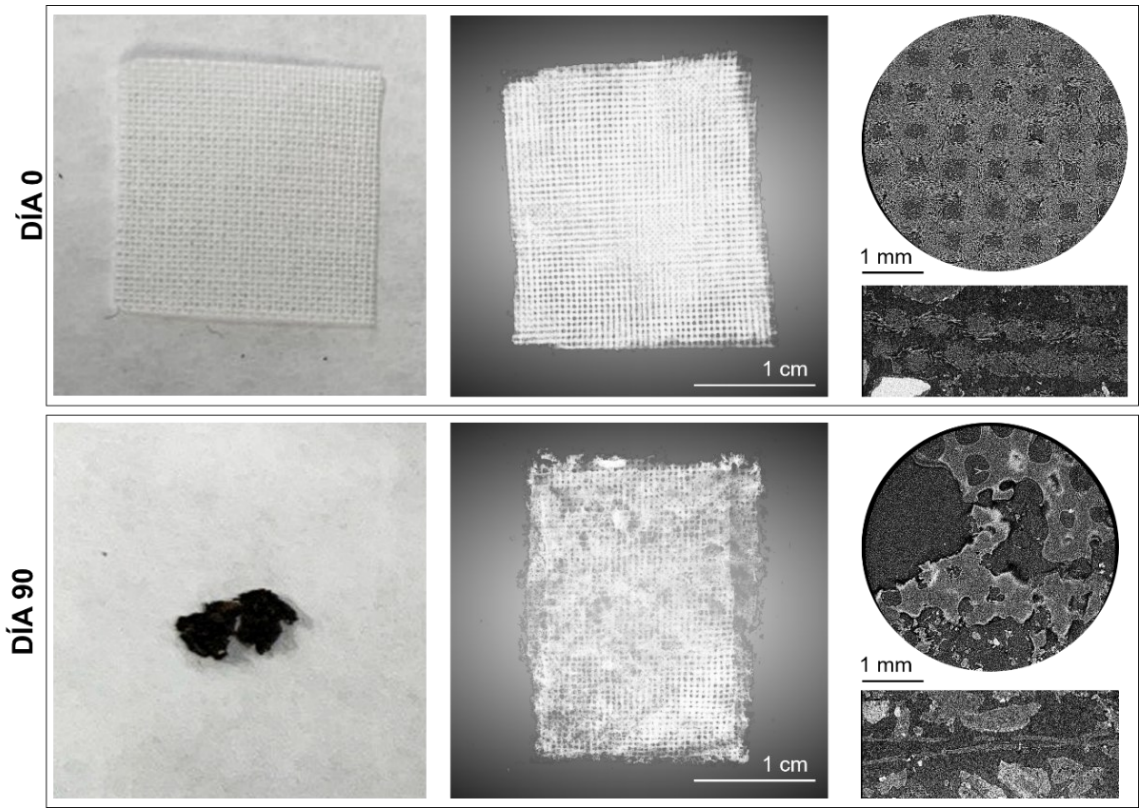



**Figura 4.** Evaluación de la fracción residual sólida del algodón mediante micro-CT. Composición propia a partir de imágenes y resultados publicados en [11]

En conjunto, los resultados integrados permiten avanzar hacia una interpretación más rigurosa del final de vida de los materiales textiles, diferenciando entre mineralización, deterioro físico, permanencia estructural y efecto de los tratamientos aplicados. Esta aproximación constituye una herramienta útil para la investigación científica y para el desarrollo de textiles más sostenibles desde una perspectiva de ciclo de vida.

## REFERENCIAS

[1] Niinimäki, Kirsi; Peters, Greg; Dahlbo, Helena; Perry, Patsy; Rissanen, Timo; Gwilt, Alison (2020). "The environmental price of fast fashion" *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 4, p.p. 189–200. http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9.

[2] Sandin, Gustav; Peters, Greg M. (2018). "Environmental impact of textile reuse and recycling – A review" *J. Clean. Prod.* v. 184, p.p. 353–365. http://dx.doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.266

[3] Piribauer, Benjamin; Bartl, Andreas (2019). "Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review" *Waste Management and Research,* v. 37, n. 2, p.p. 112–119. https://doi.org/10.1177/0734242X18819277

[4] Patti, Antonella; Cicala, Gianluca; Acierno, Domenico (2020). "Eco-Sustainability of the

Textile Production: Waste Recovery and Current Recycling in the Composites World" *Polymers,* v. 13, n. 1, p.p. 134. https://doi.org/10.3390/POLYM13010134

[5] Skilbeck, Olivia J.; Blackburn, Richard S.; Kay, Paul (2025). "A review on the biodegradation of textiles in the environment" *Environ. Toxicol. Chem.* https://doi.org/10.1093/ETOJNL/VGAF229

[6] Shah, Aamer Ali; Hasan, Fariha; Hameed, Abdul; Ahmed, Safia (2008). "Biological degradation of plastics: A comprehensive review" *Biotechnol. Adv.*v. 26, n. 3, p.p. 246–265. https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2007.12.005

[7] International Organization for Standardization (2019). "ISO 17556:2019. Plastics. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer. Method by analysis of evolved carbon dioxide".

[8] International Organization for Standardization (2012). "ISO 14855-1:2012. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions – Method by analysis of evolved carbon dioxide. Part 1: General method".

[9] ASTM International (2015). "ASTM D5338-15. Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions, incorporating thermophilic temperatures".

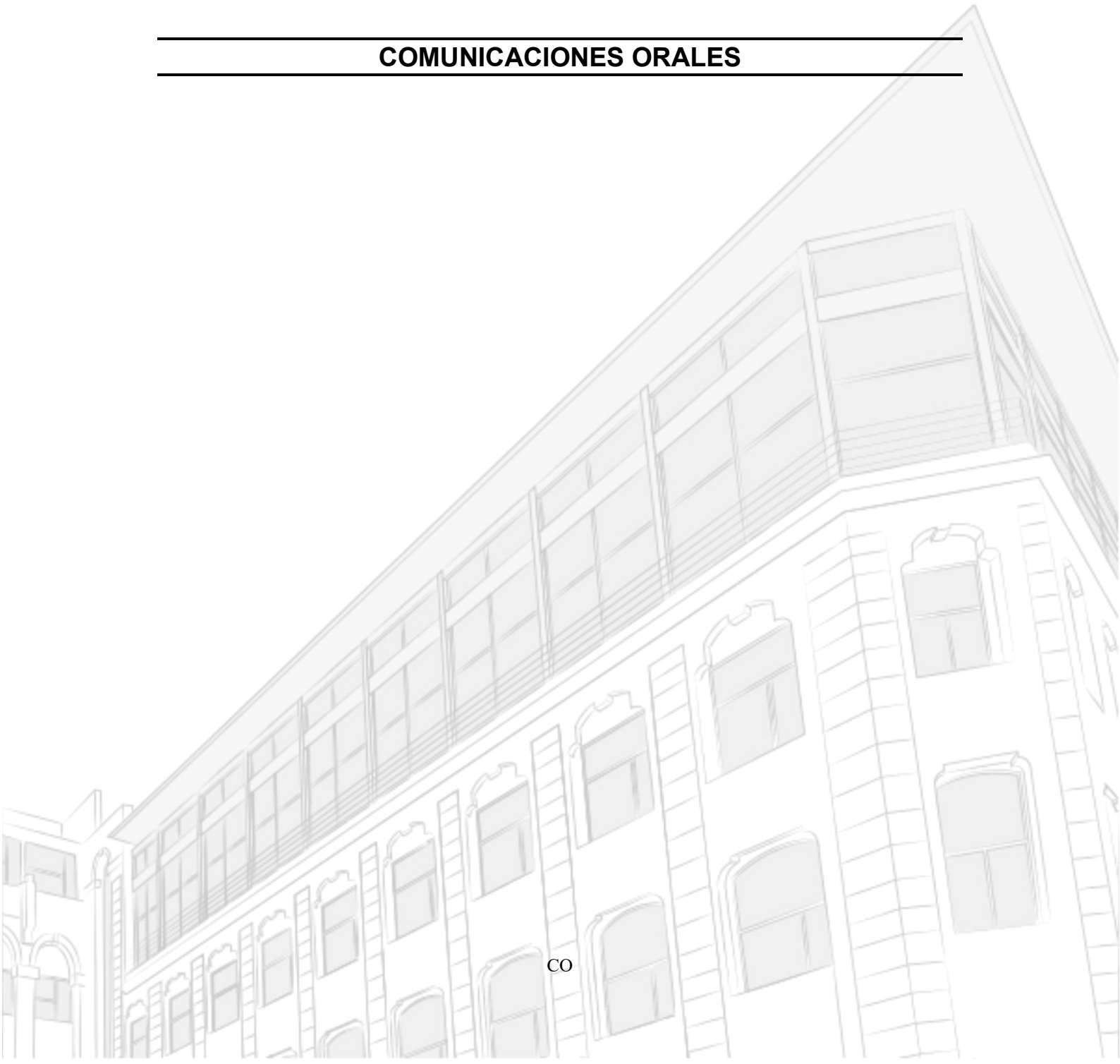
[10] ASTM International (2012). "ASTM D5988-12. Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil by Measuring the Released Carbon Dioxide".

[11] Sánchez-Martínez, Ainhoa; Bonet-Aracil, Marilés; Montava, Ignacio; Gisbert-Payá, Jaime (2026). "Respirometry and X-Ray Microtomography for a Comprehensive Assessment of Textile Biodegradation in Soil" *Textiles*, v. 6, n. 1, p.p. 14. https://doi.org/10.3390/textiles6010014

[12] Sánchez-Martínez, Ainhoa; Díaz-García, Pablo; Bonet-Aracil, Marilés; Gisbert-Payá, Jaime (2026). "Biodegradation of cotton cellulose in terrestrial conditions: influence of abiotic factors and structural analysis" *Cellulose*, v. 33, p.p. 3197–3222. https://doi.org/10.1007/s10570-026-07014-2

[13] Sánchez-Martínez, Ainhoa; Mira Martínez, Alejandro; Mira Penalva, Inés; Belda Anaya, Raquel; Montava, Ignacio; Gisbert-Payá, Jaime (2024). "Influence of Laccase Enzyme on the Biodegradability of Indigo Blue Dyed 100% Cotton Fabrics" *Advances in Science and Technology*, v. 146, p.p. 23–31. http://dx.doi.org/10.4028/p-3Yythr

# COMUNICACIONES ORALES



# Resolución del despacho económico en sistemas eléctricos mediante el método de la función barrera

**Beleña, Christian**
*Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, Algirós, 46022 València, Valencia, chbepos@doctor.upv.es*

## RESUMEN

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia SEP, surge un problema de optimización llamado despacho económico, cuyo objetivo consiste en determinar la asignación óptima de potencia que debe producir cada unidad generadora para satisfacer una determinada demanda minimizando el coste de explotación y respetando las restricciones técnicas del sistema tales como los límites de generación o la capacidad de la red de transporte.

La resolución clásica de este problema se basa en técnicas deterministas, como el método de Newton o los multiplicadores de Lagrange. En este caso se emplean métodos de punto interior, los cuales permiten resolver problemas restringidos mediante iteraciones que permanecen dentro de la región factible y se aproximan progresivamente a la solución óptima. Dentro de esta familia, se selecciona el método de función barrera, el cual transforma las restricciones de desigualdad e impide que las variables alcancen los límites del conjunto admisible.

En cuanto a los casos de estudio, se formulan dos modelos: el despacho económico sin red, planteado como un problema QP convexo, y el despacho económico con red y pérdidas, formulado como un problema QCQP convexo. Para cada formulación se analizan casos de complejidad creciente y se comparan los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** despacho económico, función barrera, punto interior, optimización convexa, programación cuadrática, QCQP, sistemas eléctricos.

## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes

En el ámbito de la ingeniería eléctrica una de las ramas que más se ha desarrollado desde la industrialización del siglo XIX es el control de la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los puntos de consumo. La descentralización en la generación, el creciente número de puntos de consumo dispersos y la introducción al sistema de nuevas tecnologías de generación ha dado lugar a un sistema eléctrico interconectado de grandes dimensiones donde se integran generadores, líneas de transporte, consumidores, sistemas de regulación y sistemas de protección y control.

Los SEP disponen de una representación estándar como se muestra en la siguiente figura donde se pueden identificar los elementos constitutivos, los flujos de potencia activa y reactiva, los valores tensión de barras y las demandas de potencia.

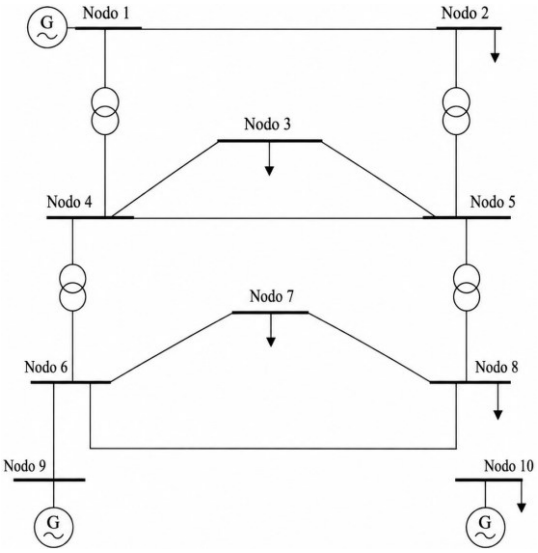



**Figura 1.** Diagrama unifilar SEP.

La operación y explotación de los SEP exige mantener continuamente el equilibrio entre generación y demanda para garantizar la seguridad y estabilidad del sistema. Esta exigencia es el punto de partida de un problema llamado despacho económico cuyo objetivo principal es decidir cuanta energía debe producir cada unidad de generación minimizando los costes de generación respetando las restricciones físicas y operativas de la red [1,2,5].

El modelo de despacho económico clásico, también conocido como modelo de despacho económico sin red se formula como un problema de optimización que consiste en determinar la potencia $P_i$ en megavatios (MW) que debe suministrar cada una de las i unidades generadoras para satisfacer una demanda de potencia $P_d$ minimizando el coste de explotación en €/h de las unidades de generación el cual se expresa mediante una función cuadrática convexa $C_i$ dependiente de la potencia generada [1,3,4].

$$C_i = a_i + b_i P_i + \frac{1}{2} c_i P_i^2$$

Donde los parámetros positivos $a_i$, $b_i$ y $c_i$ caracterizan la curva de coste del generador, especialmente $a_i$ el cual representa el coste de disponibilidad de esa unidad, es decir, el coste incurrido a producción nula.

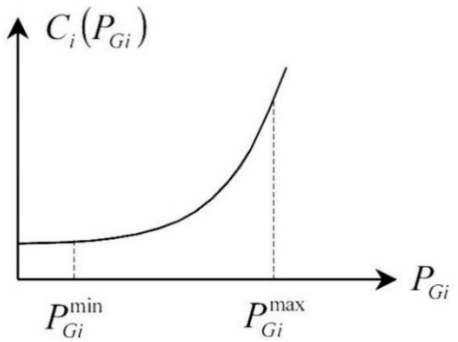



**Figura 2.** Curva de generador.

Este modelo tan solo considera el equilibrio del sistema entre generación y demanda, es decir, la energía producida en las unidades de generación se transmite hasta los consumidores sin considerar restricciones técnicas como límites de generación o de transmisión ni perdidas de energía por efecto Joule. [3, 4].

Aplicando el principio de superposición, la función objetivo *C* de este problema de optimización es la suma de las curvas de coste de cada uno de los *n* generadores.

$$C = \sum_{i=1}^{n} \left( a_i + b_i P_i + \frac{1}{2} c_i P_i^2 \right)$$

Para garantizar la estabilidad del sistema se debe cumplir que la potencia total generada sea igual a la potencia demandada $P_d$ incluyendo las pérdidas de energía por efecto Joule $L_i$.

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_d + L_i$$

$$L_i = d P_i^2$$

A partir de las nociones anteriores, se formula el modelo de despacho económico para un sistema de *n* generadores considerando la no negatividad de la potencia entregada por los generadores $P_i \geq 0$, sus límites de generación $P_i^{min}$ y $P_i^{max}$ así como las pérdidas por efecto Joule.

Minimizar

$$\sum_{i=1}^{n} \left( a_i + b_i P_i + \frac{1}{2} c_i P_i^2 \right)$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^{n} P_i - P_d - d P_i^2 \leq 0$$

$$P_i^{min} \leq 0$$

$$P_i \leq P_i^{max}$$

$$P_i \geq 0$$

En este modelo el valor de la constante *a* asociada a los generadores y el factor de pérdidas *d* toman valores positivos, por lo que la función objetivo tiene una matriz hessiana definida positiva y es estrictamente convexa. Además, al ser la restricción de equilibrio una función afín, el conjunto factible es convexo y, por lo tanto, puede afirmarse que el problema tiene un único óptimo global.

De este modo, el modelo se formula un problema de programación cuadrática cuadráticamente restringido y convexo, dando lugar al llamado modelo QCQP-convexo.

En cuanto a los casos de estudio, se analizan siguientes SEP resolviendo, para cada uno de ellos, el modelo de despacho económico sin pérdidas y el modelo con pérdidas mediante un método de punto interior con función barrera logarítmica.




**Figura 3.** Diagrama unifilar SEP 1




**Figura 4.** Diagrama unifilar SEP 2

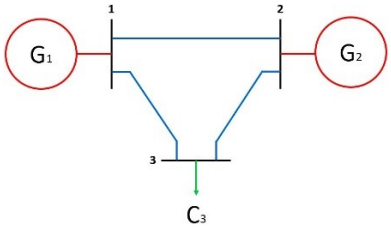



**Figura 5.** Diagrama unifilar SEP 3

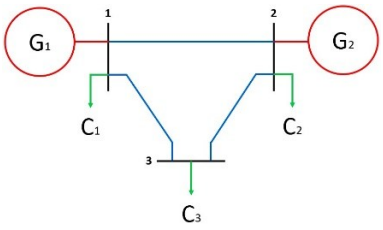



**Figura 6.** Diagrama unifilar SEP 4

**Tabla 1.** Valores SEP 1

| | Curva de coste | Límite inferior | Límite superior | Demanda |
|---|---|---|---|---|
| Barra 1 | $0,05P^2 - 10P + 500$ | 0 | 100 | - |
| Barra 2 | - | - | - | 50 |

**Tabla 2.** Valores SEP 2

| | Curva de coste | Límite inferior | Límite superior | Demanda |
|---|---|---|---|---|
| Barra 1 | $0,05P^2 - 10P + 500$ | 0 | 300 | 400 |
| Barra 2 | $0,02P^2 - 4P + 200$ | 0 | 500 | 200 |

**Tabla 3.** Valores SEP 3

| | Curva de coste | Límite inferior | Límite superior | Demanda |
|---|---|---|---|---|
| Barra 1 | $0,05P^2 - 10P + 500$ | 0 | 300 | - |
| Barra 2 | $0,02P^2 - 4P + 200$ | 0 | 500 | - |
| Barra 3 | - | - | - | 800 |

**Tabla 4.** Valores SEP 4

| | Curva de coste | Límite inferior | Límite superior | Demanda |
|---|---|---|---|---|
| Barra 1 | $0,05P^2 - 10P + 500$ | 0 | 300 | 400 |
| Barra 2 | $0,02P^2 - 4P + 200$ | 0 | 500 | 600 |
| Barra 3 | $0,03P^2 - 6P + 300$ | 0 | 1200 | 800 |

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo modelar y analizar el problema de despacho económico y describir las principales variantes de modelado empleadas en la operación de los SEP. En particular, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Presentar la formulación básica del despacho económico con funciones de coste y restricciones operativas.
- Describir las extensiones del despacho económico identificando las variables y restricciones adicionales.
- Relacionar cada variante del problema con el modelo de optimización asociado y discutir los criterios de selección según su complejidad.

## RESULTADOS

Una vez analizados los casos de estudio, se recopilan los resultados obtenidos en forma de tabla comparando los modelos con y sin pérdidas.

**Tabla 5.** SEP 2-1-1 sin pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 50 | 125 |

**Tabla 6.** SEP 2-1-1 sin pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 52.78 | 111.45 |

**Tabla 7.** SEP 2-2 sin pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 214.29 | - |
| 2 | 385.71 | - |
| Total | 600 | 2285.71 |

**Tabla 8.** SEP 2-2 con pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 300 | - |
| 2 | 400 | - |
| Total | 700 | 3800 |

**Tabla 9.** SEP 3-2-1 sin pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 300 | - |
| 2 | 500 | - |
| Total | 800 | 5200 |

**Tabla 10.** SEP 3-2-1 con pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 236.29 | - |
| 2 | 325.48 | - |
| Total | 561.77 | 1945.58 |

**Tabla 11.** SEP 3-2-3 sin pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 300 | - |
| Generador 2 | 500 | - |
| Generador 3 | 1000 | - |
| Total | 1800 | 29500 |

**Tabla 12.** SEP 3-2-3 con pérdidas

| Generador | Potencia (MW) | Coste (€/h) |
|---|---|---|
| 1 | 300 | - |
| Generador 2 | 441.83 | - |
| Generador 3 | 418.66 | - |
| Total | 1160.49 | 7383.27 |

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman los valores esperados del despacho económico. En el caso sin pérdidas se observa un óptimo interior cuando la demanda es compatible con los rangos de generación sin necesidad de saturar límites, mientras que cuando la demanda obliga a operar en frontera el óptimo se alcanza activando cotas y reasignando el balance al resto de unidades. En el caso particular en el que el conjunto factible colapsa a un único punto sobre la frontera, el óptimo queda determinado por las restricciones activas y la barrera logarítmica no aporta iteraciones interiores al no existir un punto estrictamente factible.

En cambio, en los casos con pérdidas se identifican dos efectos relevantes. Por un lado, la generación total requerida aumenta respecto a la demanda, ya que parte de la potencia se destina a pérdidas que se disipan en forma de calor por efecto Joule tal y como se refleja en soluciones donde la potencia generada supera la demanda nominal. Por otro lado, la presencia de pérdidas altera las condiciones de estacionariedad e influye en la activación de los límites, tal y como se ha observado en casos donde el candidato interior incumple el valor máximo de alguna unidad de generación y la solución óptima con cotas se desplaza a la frontera saturando el generador correspondiente.

Como conclusión general, el enfoque basado en condiciones KKT y métodos de punto interior con barrera logarítmica proporciona un procedimiento estable y extensible para estudiar diferentes modelos de despacho económico, permitiendo interpretar económicamente el multiplicador como un coste marginal, manejar de forma natural cotas operativas mediante barreras y diagnosticar con claridad cuestiones de factibilidad y regularidad. Del mismo modo, el estudio pone de manifiesto que el modelo de pérdidas mediante funciones no lineales requiere especial atención si se desea garantizar la convexidad. En los casos donde no se pueda garantizar, se recomienda explorar reformulaciones convexas tales como relajaciones mediante desigualdades o aproximaciones cónicas y evaluar tanto su viabilidad como la calidad de las soluciones.

## REFERENCIAS

[1] Gómez-Expósito, A.; Conejo, A. J.; Cañizares, C. A. (2018). *Electric energy systems: Analysis and operation*. CRC Press.

[2] Grainger, J. J.; Stevenson, W. D. (2001). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill.

[3] Kirchmayer, L. K. (1958). *Economic operation of power systems*. John Wiley & Sons.

[4] Resener, M.; Rebennack, S.; Pardalos, P. M.; Haffner, S. (2020). *Handbook of optimization in electric power distribution systems*. Springer.

[5] Wood, A. J.; Wollenberg, B. F. (1996). *Power generation, operation and control*. John Wiley & Sons.

# Procesado de Materiales Compuestos Basados en PET y Sales de Sodio con Potencial Aplicación en el Desarrollo de Dispositivos de Almacenamiento Energético

**Domínguez-Candela, Iván[1,3], Ferri, Jose Miguel[1], Lopez-Borrell, Alexis[2], Fombuena, Vicent[1], Amin Sharifi Haddad[3], Martinez-Felipe, Alfonso [3]**

*(1) Instituto Tecnológico de Materiales (ITM), Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell, 1, Alcoy 03801, España. e-mail : ivdocan@doctor.upv.es*
*(2) Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell, s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España*
*(3) Chemical Process and Materials Research Group, Centre for Energy Transition, Just Transition Lab, School of Engineering, University of Aberdeen, King's College, Aberdeen, Scotland AB24 3UE, UK*

## RESUMEN

El incremento en el uso de baterías de sodio-ion está impulsando la búsqueda de electrolitos sólidos más seguros y sostenibles. En este contexto, el poli(etilentereftalato) (PET) se plantea como matriz polimérica atractiva, aunque su baja movilidad molecular y conductividad iónica limitan su aplicación directa. Este trabajo se centra en el desarrollo de electrolitos poliméricos sólidos basados en PET modificado con ácido poliláctico (PLA), aceite de linaza epoxidado (ELO) y perclorato sódico ($NaClO_4$), empleando condiciones de extrusión e inyección próximas a las industriales. Se estudiará la influencia de estos aditivos en las propiedades mecánicas y térmicas mediante ensayos de flexión y calorimetría diferencial de barrido. Se evaluará la movilidad molecular estudiando la temperatura de transición vítrea ($T_g$) y su cristalinidad, como factores importantes para la conductividad iónica para su uso como electrolitos sólidos en baterías de sodio-ion.

**Palabras clave:** PET, electrolitos poliméricos sólidos, ELO, perclorato sódico

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el uso intensivo de polímeros de origen fósil ha ocasionado importantes problemas ambientales y, sumado a la crisis energética actual, ha acelerado la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles. En este contexto, se ha impulsado el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía más sostenibles para reducir la dependencia de recursos limitados. Entre las alternativas disponibles, las baterías de ion sodio (SIB) han generado interés no solo por el bajo coste, sino también por su gran abundancia y la no dependencia de otras fuentes como el litio [1].

Las SIB actuales están en continuo desarrollo tecnológico, destacando las de electrolitos líquidos. No obstante, el empleo de electrolitos poliméricos en estado sólido, pueden ofrecer una excelente oportunidad para desarrollar estas baterías de manera sostenibles. Entre las ventajas, destaca su facilidad de procesado polimérico, alta estabilidad térmica y mecánica, y posibilidad de reciclaje. En este aspecto, el polietilén tereftalato (PET) es una alternativa muy atractiva desde el punto de disponibilidad. Es uno de los poliésteres termoplásticos más utilizados en la actualidad, con una perspectiva de crecimiento de mercado de 47.060 millones de dólares en 2033 [2]. Pese

a no ser un polímero biodegradable, su obtención de fuentes renovables y su reciclabilidad le confiere enormes oportunidades como excelente alternativa para solventar la gran cantidad de residuos generados, ya sea por las botellas generadas o como un reciclaje de circuito cerrado. Entre las limitaciones más destacables del PET en el ámbito de SIB, es la baja movilidad molecular definida por su temperatura de transición vítrea ($T_g$) y su baja conductividad iónica [3]. Uno de los retos es el desarrollo de nuevos electrolitos sólidos basados en polímeros de origen renovable, incluyendo biopolímeros o plastificantes que no comprometan la procesabilidad del material. El PET, es uno de los polímeros más empleados a nivel industrial y a su vez, con mayor exigencia desde el punto de vista de procesabilidad. El procesado requiere temperaturas elevadas de 250-260 ºC, en función del tipo de PET, además de bajas condiciones de humedad en granza, que pueden favorecer la hidrólisis y dificultad en el procesado e inyectado de piezas. En este aspecto, entre los biopolímeros que pueden emplearse para este fin, destacarían el ácido poliláctico (PLA) y plastificantes de origen vegetal como los aceites epoxidados. En ambos casos, presentan suficiente estabilidad térmica para el procesado con el PET, aumentando su contenido biobasado y favoreciendo la movilidad molecular que puede permitir una mejora de movilidad iónica.

En todas las SIB, es necesario la incorporación de una sal dopante, en este caso de sodio como el perclorato sódico ($NaClO_4$), la cual será decisiva para aportar y definir la conductividad iónica. La conductividad iónica de los polímeros depende directamente de la flexibilidad y facilidad moleculares, determinada por la $T_g$, y la cristalinidad del polímero [4]. Por ese motivo, el actual trabajo se centra en obtener formulaciones con alto contenido biobasado, con mejores movilidades moleculares y que contengan sales para su aplicación como SIB.

## OBJETIVOS

El presente trabajo persigue dos objetivos claramente diferenciados. En primer lugar, desarrollar de formulaciones basadas en PET como matriz principal para incorporar sales iónicas enfocadas a emplearse como electrolitos en estado sólido. En segundo lugar, evaluar sus propiedades mecánicas y térmicas, orientadas a reducir la temperatura de transición vítrea y, con ello, favorecer la movilidad molecular.

## MÉTODOS EXPERIMENTALES

### Materiales empleados y preparación de mezclas

El PET empleado fue el grado comercial SPRIT F80 de NOVAPET (Barbastro, Huesca, España). El copolímero presenta una temperatura de fusión entre 220-260 ºC y una viscosidad intrínseca de 0.60 dL/g. Como polímero biobasado, se empleó el PLA grado comercial 2003D obtenido por NatureWorks LLC (Minnetonka, MN, USA). Las temperaturas de fusión, de acuerdo con la ficha técnica, está en el rango de 150-160 ºC con una viscosidad intrínseca de 0.75 dL/g. Por otro lado, el plastificante utilizado es el aceite epoxidado de linaza (ELO) suministrado por Traquisa (Barberà de Vallès, Barcelona, España), el cual presenta un contenido contenido de grupos epoxy de ≥8 %. Asimismo, se utilizó el perclorato sódico con pureza del 98 % como sal dopante suministrado por Sigma-Aldrich (Madrid, Spain)

Previo al procesado de las mezclas, las granzas fueron secadas para reducir el contenido de humedad durante la extrusión. El PET fue secado a 160ºC durante 24 h, mientras que las condiciones del PLA fueron a 60 ºC durante 24 h. Posteriormente, se

realizaron 5 formulaciones basadas en PET, tanto en porcentaje en peso (% en peso) como en per hundred resin (phr), las cuales se muestran en la Tabla 1. Cada muestra se introdujo en una microextrusora de doble husillo (DMS Explorer 5&15 CC Micro Compounder) con un perfil de temperaturas de 255/255/260 (zona de alimentación, zona central y boquilla) y una velocidad de husillo de 100 rpm. Posteriormente, cada formulación se obtuvo utilizando la unidad de inyección DSM Xplore con una capacidad de 10 mL, empleando temperatura de 255 ºC en la pistola y 55 ºC en el molde, respectivamente. Tanto en el proceso de inyección como en la compactación, se estableció 8 bares con una duración de 4 segundos en cada proceso.

**Tabla 1.** Formulaciones basadas en PET como potencial electrolito sólido.

| Muestras | PET (% en peso) | PLA (% en peso) | $NaClO_4$ (% en peso) | ELO (phr) |
|---|---|---|---|---|
| PET | 100 | - | - | - |
| PET_PLA | 85 | 15 | - | - |
| PET_ELO | 100 | - | - | 7.5 |
| PET_PLA_ELO | 85 | 15 | - | 7.5 |
| PET_10%Sal_ELO | 90 | - | 10 | 7.5 |

## ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Las principales transiciones térmicas de las formulaciones fueron evaluadas mediante la calorimetría diferencial de barrido (DSC) utilizando un calorímetro Discovery DSC 25 de TA Instruments. Se emplearon los siguientes ciclos: calentamiento, enfriamiento y calentamiento de inicial de 25 hasta 270ºC. Las muestras, pesadas entre 5-10 mg, fueron sometidas a velocidades de calentamiento y enfriamiento de 10ºC/min bajo flujo de nitrógeno (66 mL/min). El grado de cristalinidad se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\mathrm{X_c}(\%) = \frac{DH_m - DH_{cc}}{DH_{m(100\%)} \cdot w_{PET}} \cdot 100$$

donde, $DH_m$ y $DH_{cc}$ son las entalpías de fusión y cristalización en frio (J/g), respectivamente, $w_{PET}$ es la proporción de PET y $DH_{m(100\%)}$ hace referencia a la entalpía de fusión teórica del PET totalmente cristalino, cuyo valor es de 140 J/g [5].

Respecto a los ensayos de flexión, se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos modelo ELIB 30 de S.A.E. Ibertest (Madrid, España) de acuerdo con la norma ISO 178. Se empleó una velocidad de desplazamiento del cabezal fija de 5 mm/min y una célula de carga de 5 kN.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesado de las formulaciones y su posterior inyección se llevaron a cabo de manera satisfactoria, sin evidencias macroscópicas de degradación, a pesar de su posible degradación por hidrólisis. Por este motivo, numerosos estudios realizan el procesado en atmósferas inertes con el fin de minimizar la degradación hidrolítica y favorecer una adecuada dispersión de la sal en la matriz polimérica [6]. En este contexto, el presente trabajo demuestra, como novedad, la viabilidad de procesar estos sistemas a escala de laboratorio bajo condiciones más próximas a las industriales.

En primer lugar, el procesado de PET con PLA, ELO y la mezcla ternaria PET/PLA/ELO permitió la obtención de probetas aptas para su caracterización, lo que indica que las condiciones de temperatura y presión empleadas fueron adecuadas. Asimismo, fue posible obtener probetas mediante la incorporación de un 10 % en peso de perclorato sódico en una matriz de PET plastificada con ELO. A pesar del secado previo de todas las materias primas, resultó necesario optimizar el tiempo de residencia para evitar la aparición de signos de degradación en las probetas obtenidas, estableciendo 2 minutos y 45 segundos el tiempo de residencia total entre la extrusora y pistola de inyección. El aspecto visual de las probetas se muestra en la Figura 1, las cuales se caracterizarán mecánicamente mediante ensayos de flexión y térmicamente mediante DSC. Estos resultados abren una vía prometedora para el procesado de electrolitos sólidos mediante técnicas convencionales.




**Figura 1.** Aspecto físico de las formulaciones inyectadas basadas en PET.

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de flexión, tal y como se resume en la Figura 2. Los resultados de resistencia máxima a flexión obtenidos para las distintas formulaciones muestran diferencias significativas que permiten evaluar el efecto de los aditivos y sales sobre las propiedades mecánicas del PET. El PET virgen presenta una resistencia a flexión de 49,2 MPa, estableciendo el valor de referencia. La mezcla binaria PET/PLA exhibe el valor más elevado (50,1 MPa), sugiriendo que la adición de PLA contribuye a una mayor rigidez del sistema y mejora la reproducibilidad de las propiedades mecánicas. Por otra parte, la incorporación de ELO al PET provoca una disminución de la resistencia a flexión hasta 46,6 MPa, coherente con su efecto plastificante que incrementa la movilidad de las cadenas poliméricas y favorece un comportamiento más dúctil. En el caso de la formulación ternaria PET/PLA/ELO, presenta una resistencia de 43,1 MPa, sugiriendo el posible efecto plastificante del ELO sobre ambas matrices de PET y PLA. Finalmente, la formulación con 10 % de perclorato sódico y 7,5 phr de ELO muestra el valor más bajo (41,6 MPa), atribuible a que las partículas inorgánicas actúan como concentradores de tensiones. A pesar de la disminución, cabe destacar que los valores obtenidos siguen en el rango de los reportados en la bibliografía para electrolitos sólidos poliméricos basados en poli(fluoruro de vinilideno) (PVDF), triflato de litio (LiTf) y resina epoxy [7].

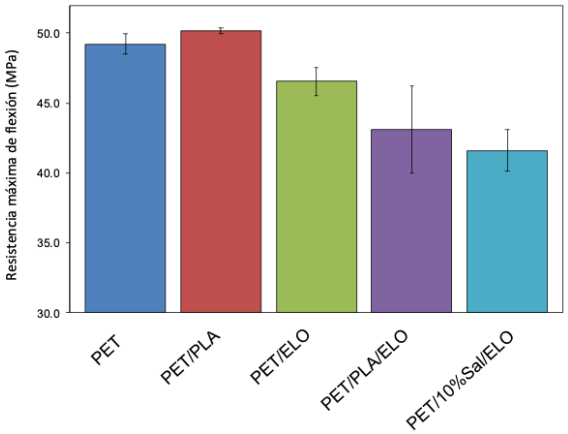



**Figura 2.** Resistencia a la flexión de las formulaciones basadas en PET.

Los resultados de DSC obtenidos para las distintas formulaciones indican cambios significativos en las propiedades térmicas del PET tras la incorporación aditivos y sales, resumido en la Tabla 2. El PET puro presenta una temperatura de transición vítrea ($T_g$) de 79,7 °C, una temperatura de fusión ($T_m$) de 236,4 °C y una cristalinidad ($X_c$) del 22,0%, valores coherentes con los reportados en la bibliografía para PET semicristalino ($T_g$ ≈ 78-80 °C, $T_m$ ≈ 240-250 °C). La mezcla binaria PET/PLA muestra una $T_g$ de 58,1 °C, característica del PLA, y mantiene la $T_g$ del PET a 79,8 °C, con una menor cristalinidad del 20,3 %.

**Tabla 2.** Principales propiedades térmicas de formulaciones basadas en PET.

| Muestra | $T_{g1}$ (°C) | $T_{g2}$ (°C) | $T_m$ (°C) | ΔHm (J/g) | $X_c$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| PET | - | 79,7 | 236,4 | 30,9 | 22,0 |
| PET/PLA | 58,1 | 79,8 | 236,1 | 27,0 | 20,3 |
| PET/ELO | - | 66,6 | 234,9 | 29,9 | 23,1 |
| PET/PLA/ELO | 52,6 | * | 234,6 | 25,5 | 20,8 |
| PET/10%Sal/ELO | - | 75,4 | 236,2 | 23,4 | 20,0 |

* No es posible estimarlo

Por otro lado, la incorporación de ELO al PET reduce significativamente la $T_g$ hasta 66,6 °C, siendo valores interesantes desde el punto de vista de mejorar de movilidad molecular. En la $T_m$ se observó una disminución hasta 234,9 °C, mientras que la cristalinidad aumenta ligeramente hasta 23,1 %, debido a la mejora de la movilidad de las cadenas poliméricas, reduciendo la $T_g$ y facilitando la reorganización estructural. El ligero aumento en cristalinidad sugiere que el plastificante favorece la formación de dominios cristalinos más perfectos durante el enfriamiento. La formulación ternaria PET/PLA/ELO presenta una $T_g$ de 52,6 °C para el PLA, mientras que no es apreciable la del PET. A pesar de ello, se observa el efecto plastificante del ELO que confiere mayor movilidad al sistema, con un ligero aumento de cristalinidad al 20,8 % respecto al PET/PLA. Finalmente, la formulación con 10 % de perclorato sódico y 7,5 phr de ELO mostró una $T_g$ con un valor 75,4 °C, siendo valores superiores al PET/ELO. Esto está sugiriendo que la presencia de sal en PET/ELO restringe la movilidad de las cadenas, pero con valores inferiores al PET virgen. Asimismo, la cristalinidad observada es inferior a la del PET/ELO y PET virgen, indicando que la presencia de sal dificulta la reorganización cristalina. Ambos efectos, la disminución de $T_g$ y menor cristalinidad, muestran que la movilidad molecular se ha mejorado, con lo que puede tener efectos positivos en la movilidad iónica que se ve mejorada con dominios amorfos [4].

## CONCLUSIONES

Las formulaciones basadas en PET se procesaron satisfactoriamente mediante extrusión e inyección, demostrando la viabilidad de incorporar PLA, ELO $NaClO_4$. Los ensayos de flexión muestran que el PLA aumenta ligeramente la rigidez, mientras que ELO y la sal reducen la resistencia a la flexión (41,6 MPa) respecto al PET virgen (49,2 MPa), coherente con su efecto plastificante y con la presencia de partículas inorgánicas que actúan como concentradoras de tensión. Paralelamente, los resultados de DSC confirman la plastificación efectiva del PET con ELO con valores de $T_g$ de 66,6 ºC respecto al PET (79,7 ºC). Este efecto también se observa en la formulación de PET/10%Sal/ELO con valores de $T_g$ de 75,4 ºC, siendo valores inferiores al PET virgen. Este resultado, junto a la menor cristalinidad respecto al PET, indican que la nueva formulación dopada con sal presenta una mayor movilidad molecular, siendo potencialmente atractivo como electrolitos sólidos. En estudios futuros, se caracterizará la conductividad iónica de estas formulaciones para estudiar su potencial.

## AGRADECIMIENTOS

I. Domínguez-Candela agradece a la Generalitat Valenciana (GVA) la financiación del puesto de posdoctorado a través del programa CIAPOS, cofinanciado por el FSE «Invertir en tu futuro», con el número de subvención CIAPOS/2024/341.

## REFERENCIAS

[1] Zhao, Y.; Zhang, Z.; Zheng, Y.; Luo, Y.; Jiang, X.; Wang, Y.; ... Fang, B. (2024). "Sodium-ion battery at low temperature: challenges and strategies". *Nanomaterials*, v. 14, n. 9, p. 1604. https://doi.org/10.3390/nano14191604

[2] Precedence Research. Polyethylene Terephthalate Market Size, Share, and Trends 2026 https://www.precedenceresearch.com/polyethylene-terephthalate-market

[3] Kechadi, M.; Chaal, L.; Vivier, V.; Tribollet, B.; Gamby, J. (2016). "Electrical impedance spectroscopy of a PET chip sandwiched between two disk electrodes: understanding the contribution of the polymer/electrode interface". *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 18(30), p.p 20583-20590. https://doi.org/10.1039/C6CP03042D

[4] Mei, X.; Zhao, W.; Ma, Q.; Yue, Z.; Dunya, H.; He, Q.; ... Mandal, B. K. (2020). "Solid polymer electrolytes derived from crosslinked polystyrene nanoparticles covalently functionalized with a low lattice energy lithium salt moiety". *ChemEngineering*, v. 4, n. 3, p. 44. https://doi.org/10.3390/chemengineering4030044

[5] Wunderlich, B. (2012). *Macromolecular physics V2 (Vol. 2)*. Lugar de publicación: Nueva York. Editado por: Elsevier Science. ISBN: 978 0 12 765602 1

[6] Joyal, N.; Chang, Y. C.; Shonar, M.; Chalivendra, V.; Shen, C. (2022). "Solid polymer electrolytes with hydrates for structural supercapacitors". *Journal of Energy Storage*, v. 51, p. 104459. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104459

[7] Xu, Y., Pei, S., Yan, Y., Wang, L., Xu, G., Yarlagadda, S., & Chou, T. W. (2021). "High-performance structural supercapacitors based on aligned discontinuous carbon fiber electrodes and solid polymer electrolytes". *ACS applied materials & interfaces*, v. 13, n. 10, p.p. 11774-11782. https://doi.org/10.1021/acsami.0c19550

# EDU4Plastic: Innovación frente al reto de los microplásticos en una economía circular y climáticamente neutra

**Ferrandiz, Santiago[(1)], Perniu, Dana[(2)], Rada, Elena Cristina[(3)], Draghici, Anca[(4)], Bubik, Anja[(5)], Dermol, Špela[(6)]**

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València (IUTM),Plaza Ferrandiz Carbonell,s/n, 03801 Alcoi; sferrand@mcm.upv.es*

*(2) Faculty of Product Design and Environment, Transylvania University of Brasov, Romania*

*(3) Department of Theoretical and Applied Sciences, University of Insubria, Varese, Italy*

*(4) Faculty of Management in Production and Transportation, Polytechnic University Timisoara, Romania*

*(5) Faculty of Environmental Protection, Velenje, Slovenia*

*(6) Dermol svetovanje d.o.o., Šmartno pri Litiji, Slovenia*

## RESUMEN

La creciente contaminación por plásticos y la proliferación de microplásticos en el medio ambiente constituyen uno de los mayores desafíos ecológicos del siglo XXI. El proyecto Erasmus+ EDU4PlastiCircular surge como una respuesta colaborativa a nivel europeo para integrar los principios de la economía circular y la neutralidad climática en las instituciones de Educación Superior. Se describe el marco metodológico, los objetivos y los resultados del proyecto, el cual involucra un consorcio estratégico entre universidades e instituciones de Rumanía, Italia, España y Eslovenia. A través de la recopilación de buenas prácticas, el diseño de un programa de formación innovador y el despliegue de una plataforma de e-learning abierta, el proyecto persigue capacitar a docentes, estudiantes y profesionales del sector industrial.

Los resultados iniciales destacan la identificación de carencias en los programas educativos actuales y la creación de sinergias industriales para evitar que los residuos plásticos terminen en el entorno. Se concluye que la actualización de los currículos universitarios es un pilar indispensable para dotar a los futuros profesionales de las competencias necesarias para liderar la transición ecológica.

**Palabras clave:** plásticos; residuos plásticos; economía circular y neutra; programa de formación; competencias/habilidades verdes.

## INTRODUCCIÓN

El plástico se ha vuelto esencial en varias áreas económicas y en la vida diaria, abarcando áreas como la edificación, el transporte, las energías renovables, el empaquetado, la higiene, la vestimenta y los deportes [1]. La producción mundial de plásticos alcanzó aproximadamente 430,9 a 436 millones de toneladas métricas en 2023-2024 [2]. Se estima que el 60 % de todos los plásticos hechos han ido a vertederos o están en la naturaleza, mientras que solo el 10 % se ha reciclado. Alrededor del 30% de todas las piezas de plástico producidas [2,3]. Esto ha provocado que la contaminación plástica se transforme en una cuestión ambiental global de gran importancia, impulsada en gran medida por el uso generalizado de plásticos de un solo uso [4].

El modelo económico lineal tradicional, basado en "extraer, fabricar y desechar", ha llevado a una acumulación sin precedentes de residuos plásticos a nivel global. A pesar de los esfuerzos recientes, una cantidad alarmante de estos materiales termina en ecosistemas marinos y terrestres, degradándose en microplásticos que amenazan la biodiversidad y la salud humana. En respuesta a esta crisis, el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) y el Plan de Acción para la Economía Circular establecen directrices claras para transformar la manera en que se diseñan, utilizan y reciclan los plásticos.

Sin embargo, para que esta transición tecnológica e industrial sea efectiva, se requiere un cambio de paradigma desde la base del conocimiento: la Educación Superior. Las universidades deben adaptar sus currículos en ingeniería, gestión y ciencias ambientales para formar líderes capaces de implementar estrategias de simbiosis industrial y ecodiseño.

En este contexto nace el proyecto EDU4PlastiCircular (*Education for Plastic in a Circular and Climate Neutral Economy - Preventing Waste Ending Up into the Environment*), cofinanciado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea (Referencia: 2023-1-RO01-KA220-HED-000166242) [3, 5-8]. Con una duración de 36 meses (2023-2026) [9], el proyecto reúne a socios de Rumanía, Italia, España y Eslovenia, con el propósito de crear un ecosistema educativo abierto que aborde la circularidad de los plásticos.

## OBJETIVOS

El proyecto EDU4Plastic no se limita a la investigación teórica, sino que busca generar un impacto tangible en la comunidad educativa e industrial. El objetivo principal es equipar al sector de la Educación Superior con herramientas pedagógicas innovadoras para enseñar de manera efectiva los principios de la economía circular aplicada a los plásticos.

De este propósito principal se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y analizar las deficiencias metodológicas y de contenido en los programas de formación actuales relacionados con los plásticos y el medio ambiente (Gap Analysis).
- Recopilar y transferir buenas prácticas internacionales de gestión sostenible de plásticos, como las implementadas por la Red de Universidades Italianas para el Desarrollo Sostenible o los talleres de simbiosis industrial en España.
- Desarrollar un marco de formación compuesto por materiales didácticos abiertos (OER) y métodos de aprendizaje innovadores.
- Diseñar y lanzar una plataforma de e-learning (alojada en microplastics.today) junto con una biblioteca digital integral.
- Capacitar (upskilling) a un mínimo de 200 estudiantes y profesionales a través de pruebas piloto en los países asociados.

## RESULTADOS

Para garantizar la relevancia y la aplicabilidad de los recursos generados, el proyecto se estructura en paquetes de trabajo (Work Packages - WP) que siguen una metodología escalonada:

1. Análisis de la Situación Actual y Carencias (WP2): Se realizó un mapeo exhaustivo de los cursos de educación superior existentes sobre bioplásticos, ecodiseño y gestión de residuos. A través de este análisis de brechas (Gap Analysis), se determinaron las competencias críticas que faltan en los perfiles profesionales actuales.
2. Recopilación de Casos de Éxito y Simbiosis: Los socios del proyecto documentaron casos reales de éxito. Por ejemplo, se analizaron iniciativas regionales como la estrategia Plastic Free de la región de Emilia-Romaña (Italia) y talleres de circularidad en institutos tecnológicos y universidades.
3. Desarrollo del Currículo Modular: Basándose en los datos obtenidos, se procedió a la estructuración de módulos de aprendizaje flexibles, adaptables tanto a estudiantes universitarios de grado y posgrado (como directores de tesis doctorales en Ingeniería y Gestión), como a emprendedores del sector plástico.
4. Digitalización y Validación: Creación de la plataforma de e-learning, integrando el sistema de gestión de contenidos y evaluando la usabilidad mediante sesiones piloto interactivas en los distintos nodos geográficos del consorcio.




**Figura 1.** Plataforma e-learning activa. https://microplastics.today/

La plataforma presenta en varios apartados que contienen diferentes materiales didácticos pensados para progresar en el dominio de la economía circular de microplásticos. Se han preparado lecturas, presentaciones, exámenes, normativa y resultados de aprendizaje.

El curso se divide en cinco módulos, cada uno con entre 4 y 6 lecciones. Los módulos incluyen formación en:

- Introducción al mundo del plástico.
- Gestión de residuos plásticos.
- El plástico en la economía circular y la economía climáticamente neutra.

- Innovación en el mundo del plástico.
- Concienciación sobre el impacto de los residuos plásticos y el comportamiento responsable.

Para implementar y desarrollar el contenido de aprendizaje, el proyecto se centrará en varias actividades clave:

- Desarrollar métodos de capacitación innovadores adaptados al personal, estudiantes, directivos y empleados de instituciones de educación superior, que se recopilarán en un manual completo.
- Crear y facilitar el acceso a materiales de capacitación a través de plataformas en línea y móviles, incluyendo una biblioteca digital, contenido de aprendizaje electrónico y una plataforma de aprendizaje electrónico.
- Evaluar la eficacia de los métodos, materiales y la plataforma de aprendizaje en línea/móvil. Esta fase culminará con una plataforma de aprendizaje electrónico probada, la impartición de cursos tanto en línea como presenciales, y la formación de 200 participantes piloto.
- Garantizar la sostenibilidad a largo plazo y el impacto del programa de formación EDU4PlastiCircular mediante la formulación de un plan de sostenibilidad, un modelo de negocio posterior al proyecto y el establecimiento de futuras colaboraciones con socios, empresas de trabajo remoto u organismos públicos a través de acuerdos y cartas de cooperación.

La eficacia de la plataforma y la calidad de los cursos se evaluarán mediante la retroalimentación de los estudiantes, que se utilizará para perfeccionar los cursos y garantizar su perfecta integración en los sistemas de aprendizaje electrónico de las instituciones de educación superior y en las plataformas de recursos educativos abiertos (REA).

Además, el proyecto incluye dos actividades de aprendizaje, enseñanza y capacitación (AAC) para mejorar las habilidades de los formadores. Al finalizar el curso el alumno obtendrá un certificado de superación de la formación recibida.

El número de alumnos que han finalizado el curso (hasta abril del 2026) se puede observar en la Figura 2, habiéndose superado el mínimo previsto.




**Figura 2.** Alumnos globales del proyecto que han finalizado.

El total de alumnos (hasta el momento) que han finalizado el curso es de 267. Desde la UPV han participado alumnos del grado de mecánica, grado de diseño industrial y el master universitario de diseño, procesado y caracterización de materiales, impartidas en el Campus de Alcoy.

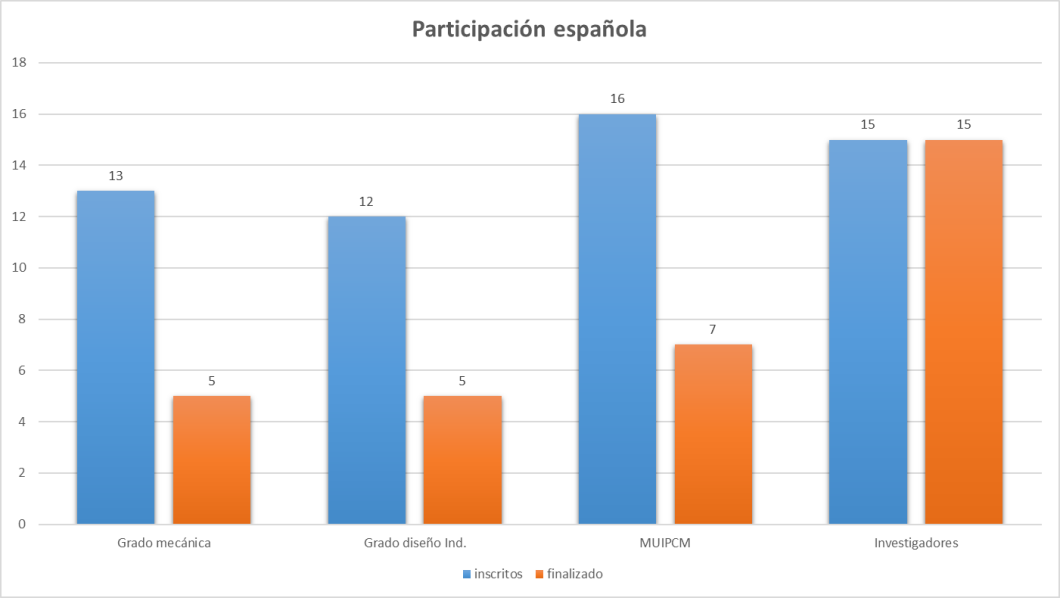



**Figura 3.** Distribución de participantes por titulación.

En resumen, en España, se han inscrito un total de 56 estudiantes, finalizando la formación 32 estudiantes (con emisión de certificado), lo que supone un éxito del 57%. El curso puede seguirse en la plataforma https://microplastics.today/.

## CONCLUSIONES

La transformación de la industria del plástico hacia la circularidad y la neutralidad climática no puede depender únicamente de normativas gubernamentales y avances tecnológicos; requiere imperativamente de la educación y concienciación de los futuros tomadores de decisiones.

El proyecto EDU4PlastiCircular demuestra que la Educación Superior es la piedra angular para este cambio. Al desarrollar recursos educativos de acceso abierto, basados en datos reales y buenas prácticas internacionales, el consorcio está cerrando la brecha entre la teoría académica y las necesidades urgentes del mercado laboral verde.

Las conclusiones preliminares indican que el aprendizaje basado en la resolución de problemas reales y el estudio de la simbiosis industrial aumenta significativamente el compromiso de los estudiantes. Se espera que, a la finalización del proyecto en 2026, el marco metodológico generado pueda ser replicado y adoptado por otras universidades de la Unión Europea y más allá, asegurando una sostenibilidad a largo plazo en la lucha contra la contaminación por microplásticos).

## REFERENCIAS

[1] Mrowiec, Bozena (2018). “Plastics in the circular economy (CE)”. *Environmental Protection and Natural Resources*, v. 29, n. 4, p.p. 16-19. https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0017

[2] Axioma (2026). “Producción global de plásticos se expande hasta 430,9 millones de toneladas y Europa pierde competitividad”. *Tecnología del plástico. www.plastico.com*.

[3] Geyer, Roland; *et al.* (2017). “Production, use, and fate of all plastics ever made”. *Science Advances*, v. 3, n. 7, p.p. e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700

[4] Syberg, Kristian; *et al.* (2021). “Regulation of plastic from a circular economy perspective”. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 29, p.p. 100462. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100462.

[5] Consorcio EDU4PlastiCircular (2024). “Analysis of existing training programmes for plastic in circular economy and climate-neutral economy (Deliverable D2.2)”. *https://microplastics.today/*

[6] Comisión Europea (2020). “Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular por una Europa más limpia y más competitiva”. Comunicación de la Comisión.

[7] Consorcio EDU4PlastiCircular. (2024). “Analysis of existing training programmes for plastic in circular economy and climate-neutral economy (Deliverable D2.2)”. Recuperado de la plataforma Microplastics.today.

[8] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2019). “Directiva (UE) 2019/904 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente”.

[9] Universitat Politècnica de València (2024). “Circularity and industrial symbiosis strategies in the plastics sector”. Actas de Talleres del Proyecto Erasmus+ EDU4Plastic.

# Fabricando soluciones a partir de un defecto: Estado del arte y aplicación industrial de las espumas metálicas

**Aguilar, Tamara[(1)], Ferrandiz, Santiago[(2)], Kunowsky, Mirko[(1)]**

*(1) Instituto Tecnológico de Productos Infantiles y Ocio (AIJU). Avda. de la Industria 23. 03440, Ibi, Alicante, España. tamaraaguilar@aiju.es*
*(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València (IUTM), Plaza Ferrandiz Carbonell s/n, 03801 Alcoi, Alicante, España. sferrand@mcm.upv.es*

## RESUMEN

Las espumas metálicas son estructuras celulares que combinan baja densidad con buenas propiedades mecánicas y funcionales. En la fabricación aditiva mediante fusión de lecho de polvo por láser (PBF-LM), la porosidad ha sido tradicionalmente considerada un defecto que compromete el comportamiento mecánico de las piezas. Sin embargo, recientes avances han demostrado que es posible controlar esta porosidad de forma intencionada, transformándola en una variable de diseño con alto potencial funcional.

Este trabajo presenta una revisión del estado del arte de las espumas metálicas y sus principales aplicaciones industriales, junto con un enfoque metodológico para la predicción de la porosidad basado en la Densidad de Energía Volumétrica (VED). Se propone un modelo empírico simplificado que permite relacionar los parámetros de proceso con la generación de porosidad, implementado mediante una rutina computacional en Scilab.

Los resultados muestran que el control de la VED permite definir distintos regímenes de porosidad, facilitando el diseño de estructuras adaptadas a aplicaciones como moldes de inyección, implantes biomédicos y sistemas de disipación térmica.

**Palabras clave:** PBF-LM; SLM, porosidad, control de porosidad, impresión 3D.

## INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva de metales mediante tecnologías basadas en la fusión de lecho de polvo por láser (PBF-LM), también conocida como Fusión Selectiva por Láser, SLM, ha experimentado un notable desarrollo en la última década, pasando de ser una herramienta de prototipado a convertirse en un proceso industrial para la fabricación de componentes funcionales. No obstante, uno de los principales retos asociados a esta tecnología continúa siendo el control de la porosidad, la cual se origina por fenómenos como la falta de fusión, la inestabilidad del baño fundido o la presencia de gases atrapados, afectando negativamente a las propiedades mecánicas de las piezas [1,4].

Tradicionalmente, la investigación en fabricación aditiva se ha centrado en minimizar la porosidad con el objetivo de obtener materiales densos. Sin embargo, la evolución reciente de este campo ha dado lugar a un cambio de paradigma, en el que la porosidad pasa de considerarse un defecto a convertirse en una variable de diseño controlada. Este enfoque ha impulsado el desarrollo de espumas metálicas y estructuras reticulares, capaces de proporcionar una combinación única de propiedades como baja densidad,

alta resistencia específica, capacidad de absorción de energía y elevada superficie de intercambio [2,3].

Diversos estudios han demostrado que estas estructuras presentan un elevado potencial en aplicaciones industriales avanzadas. En el sector aeroespacial y automovilístico, permiten reducir el peso manteniendo la integridad estructural; en el ámbito biomédico, facilitan la osteointegración mediante la imitación del hueso trabecular; y en aplicaciones térmicas, ofrecen soluciones eficientes para la disipación de calor y el intercambio térmico [3,5].

En este contexto, resulta clave comprender la relación entre los parámetros de proceso y la generación de porosidad. Uno de los enfoques más extendidos para su análisis es el uso de parámetros integrados como la Densidad de Energía Volumétrica (VED), que permite relacionar las condiciones de fabricación con el comportamiento del material. A partir de este concepto, el presente trabajo aborda tanto el estado del arte de las espumas metálicas como el desarrollo de un enfoque simplificado para la predicción de la porosidad, basado en modelos empíricos y su implementación computacional.

## OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar el potencial de la porosidad controlada en fabricación aditiva como herramienta de diseño, mediante su aplicación en el desarrollo de espumas metálicas obtenidas por la tecnología PBF-LM.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión del estado del arte de las espumas metálicas, incluyendo sus propiedades, métodos de fabricación y principales aplicaciones industriales.
- Analizar el papel de la Densidad de Energía Volumétrica (VED) como parámetro clave en la generación de porosidad en procesos PBF-LM.
- Establecer una relación conceptual entre los parámetros de proceso y el comportamiento de la porosidad, basada en modelos empíricos descritos en la literatura.
- Desarrollar una rutina computacional en Scilab que permita predecir la porosidad en función de los parámetros de proceso y generar mapas de diseño.
- Evaluar el potencial de aplicación industrial de las estructuras generadas en función del material y del régimen de porosidad obtenido.

## RESULTADOS

En los procesos de fabricación aditiva mediante fusión de lecho de polvo por láser (PBF-LM), la generación de porosidad está directamente condicionada por la cantidad de energía introducida en el sistema durante la fusión del material. Este fenómeno está gobernado por el comportamiento del baño fundido (*melt pool*), cuya estabilidad determina la calidad de la unión entre capas y la aparición de defectos internos.

Con el objetivo de unificar los principales parámetros del proceso, se emplea la Densidad de Energía Volumétrica (VED), definida como:

$$VED = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

donde $P$ es la potencia del láser, $v$ la velocidad de escaneo, $h$ el espaciamiento entre pasadas y $t$ el espesor de capa.

La relación entre la VED y la porosidad presenta un comportamiento no lineal característico en forma de "U", ampliamente descrito en la literatura. Este comportamiento se explica por los distintos regímenes térmicos del proceso:

- Región de baja VED (falta de fusión): la energía aportada es insuficiente para fundir completamente las partículas de polvo, dando lugar a poros irregulares, de gran tamaño y generalmente interconectados.
- Región de VED óptima: se alcanza un equilibrio térmico adecuado, produciendo una fusión homogénea del material y una densidad elevada con mínima porosidad.
- Región de alta VED (keyhole): el exceso de energía provoca la vaporización del material, generando cavidades profundas e inestables y poros esféricos asociados a la captura de gas.

Este comportamiento permite interpretar la porosidad como una consecuencia directa del balance energético del proceso, proporcionando una base para su control mediante la selección de parámetros de fabricación.

Para describir cuantitativamente esta relación, se ha adoptado un modelo empírico basado en una función cuadrática:

$$p = k \cdot \left(VED - VED_{opt}\right)^2 + p_{min}$$

donde $p$ representa la porosidad,$VED_{opt}$ el valor de energía óptimo para alcanzar la máxima densidad, $p_{min}$ la porosidad residual y $k$ un parámetro empírico dependiente del material.

Este modelo permite reproducir de manera simplificada el comportamiento en "U", siendo especialmente útil para la identificación de regiones de operación en función de la porosidad objetivo.

A partir del modelo propuesto, se ha desarrollado una rutina computacional en Scilab con el objetivo de predecir y visualizar la distribución de porosidad en función de los parámetros de proceso. La metodología seguida comprende:

1. Definición de un espacio de exploración de parámetros (potencia y velocidad).
2. Cálculo de la VED para cada combinación de parámetros.
3. Aplicación del modelo empírico para estimar la porosidad.
4. Generación de superficies de respuesta tridimensionales.

Estas superficies permiten obtener mapas de porosidad, facilitando la identificación de regiones de interés asociadas a distintos regímenes del proceso. De este modo, se transforma el problema en un enfoque de diseño asistido, reduciendo la dependencia de campañas experimentales extensivas.

El comportamiento descrito no es universal, sino que depende en gran medida de las propiedades termofísicas del material procesado. En este sentido, el aluminio AlSi10Mg presenta diferencias significativas respecto a materiales como el acero inoxidable 316L o el titanio Ti6Al4V.

En primer lugar, el aluminio presenta alta reflectividad frente al láser, lo que obliga a trabajar con rangos de potencia superiores (habitualmente entre 200 y 500 W). A

potencias más bajas, el material no llega a fundirse adecuadamente, limitándose a calentarse sin generar un baño fundido estable.

Por otro lado, su alta conductividad térmica favorece la rápida disipación del calor en el material, lo que permite emplear geometrías de escaneo con mayores espaciamientos y espesores de capa (por ejemplo, h=0.15h = 0.15h=0.15 mm y t=0.05t = 0.05t=0.05 mm). Este hecho puede mejorar la productividad del proceso, aunque también introduce inestabilidades si la energía es insuficiente, favoreciendo la aparición de defectos por falta de fusión.

Adicionalmente, el aluminio presenta una porosidad intrínseca asociada al hidrógeno, derivada de la humedad absorbida por el polvo. Durante la fusión, este hidrógeno se libera en forma de gas, generando poros esféricos distribuidos en la matriz. Como consecuencia, incluso en condiciones óptimas, existe una porosidad residual que suele situarse en el rango del 0.8-1%, representada en el modelo mediante el término $p_{min}$.

Finalmente, la sensibilidad del material a las variaciones energéticas se refleja en el valor del parámetro empírico kkk. En el caso del aluminio, este parámetro presenta valores más elevados, lo que da lugar a una curva de porosidad más pronunciada. Este comportamiento indica que pequeñas variaciones en la VED pueden provocar cambios significativos en la porosidad, debido al rápido enfriamiento del baño fundido. A altas velocidades de escaneo, el material puede solidificar antes de unirse correctamente a la capa inferior, generando defectos severos por falta de fusión.

El análisis conjunto del modelo y de las simulaciones obtenidas permite diferenciar claramente las regiones de operación del proceso:

- Baja energía (alta velocidad / baja potencia): generación de estructuras porosas por falta de fusión, adecuadas para aplicaciones donde se busca permeabilidad o reducción de peso.
- Energía óptima: obtención de materiales densos con propiedades mecánicas elevadas.
- Alta energía: aparición de porosidad tipo keyhole, generalmente no deseada en aplicaciones estructurales.

Estos resultados evidencian que la porosidad puede ser controlada de forma intencionada mediante la selección adecuada de los parámetros de proceso, permitiendo adaptar el material a la funcionalidad requerida.

## CONCLUSIONES

La combinación de la rutina de predicción de porosidad basada en la Densidad de Energía Volumétrica (VED) y la rutina de evacuación de gases basada en la Ley de Darcy representa el flujo de trabajo completo en el diseño de metamateriales mediante fabricación aditiva. En este enfoque, en primer lugar, se controla la generación de la estructura celular (porosidad) a partir de los parámetros de proceso y, posteriormente, se evalúa su comportamiento funcional en una aplicación real.

La Ley de Darcy describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso y constituye el modelo físico que permite evaluar la capacidad de evacuación de gases. Puede expresarse como:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L}$$

donde $Q$ es el caudal, $k$ la permeabilidad del material, $\Delta P$ el gradiente de presión, $\mu$ la viscosidad del fluido y $L$ la longitud característica del medio. En este contexto, la permeabilidad está directamente relacionada con la porosidad generada durante el proceso PBF-LM.

1. Conexión entre energía y comportamiento funcional

El nexo entre ambas rutinas es la permeabilidad **($k$)**, que actúa como variable puente entre el proceso de fabricación y la función final del material.

La rutina basada en VED permite ajustar parámetros como la potencia del láser y la velocidad de escaneo para inducir un determinado nivel de porosidad (por ejemplo, mediante regímenes de falta de fusión). Esta porosidad, especialmente cuando es interconectada, se traduce físicamente en una permeabilidad efectiva del material.

Dicha permeabilidad es el parámetro clave en la ecuación de Darcy para determinar si el flujo de aire o gas a través del material será suficiente en una aplicación concreta, como la evacuación de gases en moldes de inyección. Sin el control previo de la porosidad, la evaluación funcional del sistema carecería de base física.

2. Acero inoxidable 316L: Aplicación en herramientas

El acero inoxidable 316L presenta un comportamiento térmico estable y una transición controlada entre estados densos y porosos, lo que se traduce en una elevada predictibilidad del proceso.

Esta característica permite diseñar estructuras porosas interconectadas estables, adecuadas para aplicaciones en insertos de moldes de inyección. Desde el punto de vista funcional, estas estructuras presentan una permeabilidad controlada que puede ser utilizada para optimizar la evacuación de gases sin comprometer la resistencia mecánica frente a la presión de inyección.

Por tanto, el acero 316L se posiciona como el material más adecuado para aplicaciones de *tooling* avanzado, como sistemas de ventilación integrados y refrigeración conformacional.

3. Titanio Ti6Al4V: Especialista en aplicaciones biomédicas y estructurales

El titanio Ti6Al4V presenta una elevada sensibilidad a las variaciones de energía, lo que se traduce en una ventana de proceso estrecha y un comportamiento fuertemente no lineal.

La generación de porosidad en este material es rápida y difícil de controlar con precisión, lo que limita su aplicación en sistemas donde se requiere una permeabilidad controlada (como moldes de inyección). No obstante, esta misma característica resulta ventajosa en aplicaciones donde se requiere una porosidad elevada y compleja.

En este sentido, el titanio es especialmente adecuado para aplicaciones biomédicas, donde la formación de estructuras porosas favorece la osteointegración, y para aplicaciones aeroespaciales, donde es necesario reducir peso manteniendo la rigidez estructural.

4. Aluminio AlSi10Mg: Material para gestión térmica

El aluminio AlSi10Mg presenta un comportamiento significativamente distinto debido a su alta reflectividad y elevada conductividad térmica, lo que lo convierte en el material más complejo de procesar.

La rápida disipación del calor provoca la solidificación prematura del baño fundido, generando defectos por falta de fusión cuando la energía es insuficiente. Además, la

presencia de hidrógeno en el polvo da lugar a una porosidad residual inherente, que no puede eliminarse completamente.

Este comportamiento se refleja en una mayor sensibilidad a la VED (mayor valor del parámetro kkk) y en una porosidad mínima superior a la de otros materiales.

A pesar de estas limitaciones, la matriz sólida mantiene una elevada conductividad térmica, lo que hace que este material sea especialmente adecuado para aplicaciones de gestión térmica, como intercambiadores de calor, disipadores y filtros porosos.

5. Implicaciones para el diseño de metamateriales

Los resultados obtenidos demuestran que no existe un conjunto universal de parámetros en PBF-LM, sino que el diseño debe basarse en la interacción entre el comportamiento termofísico del material y la función objetivo.

En este contexto, el control de la porosidad mediante VED, combinado con su interpretación a través de la Ley de Darcy, permite establecer un enfoque completo de diseño:

- Acero 316L → estructuras porosas para transferencia de gas (moldes)
- Titanio Ti6Al4V → estructuras biológicas y de absorción de energía
- Aluminio AlSi10Mg → estructuras optimizadas para disipación térmica

En conclusión, el control de la porosidad en fabricación aditiva permite “diseñar el vacío” como una propiedad funcional del material, abriendo nuevas posibilidades en el desarrollo de metamateriales avanzados.

## REFERENCIAS

[1] Hassan, Ahmed; *et al.* (2024). “A Review of Different Manufacturing Methods of Metallic Foams”. *ACS Omega*, v. 9, n. 6, p.p. 6280-6295. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08613

[2] Khalid Hamdan; *et al.* (2025). “Review of Mechanical Properties, Manufacturing, And Applications Of Metal Foams*”. Jurnal Teknologi*, v. 87, n. 4, p.p. 723-740. https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.22969

[3] Nawaz, Ali; *et al.* (2023). “Fabrication methods and property analysis of metal foams – a technical overview”*. Materials Science and Technology*, v. 39, n. 15, p.p. 1877 - 1902. https://doi.org/10.1080/02670836.2023.21860

[4] Tiwari, Arnav (2025). “A Comprehensive Review Of Metal Additive Manufacturing: Technologies, Materials, Applications, And Future Directions”*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, v. 22, n. 5, p.p 53-61. https://doi.org/10.9790/1684-2205025361

[5] Coleman, John; *et al.* (2025). “AdditiveFOAM: A Continuum Multiphysics Code for Additive Manufacturing”*. Journal of Open Source Software*, v. 10, n 109, p.p. 7770. https://doi.org/10.21105/joss.077

# Propuesta de una medida sintética de la estacionalidad turística: el caso de la Comunidad Valenciana.

**Gómez-Volpe, Rafael[(1)], Salas-Molina, Francisco [(1)], Pérez-Bernabeu, Elena[(2)]**
*(1) CEGEA-Universitat Politècnica de València, Alcoi (ragovol@upv.es, frasamo@upv.es)*
*(2) DEIO-Universitat Politècnica de València, Alcoi (elenapb@upv.es)*

## RESUMEN

El sector turístico en España ha recuperado la tendencia alcista desde la situación extraordinaria provocada por la pandemia de COVID-19, con valores en máximos históricos respecto a la entrada de turistas internacionales. La Comunidad Valenciana constituye un referente por sus recursos naturales, su infraestructura y su situación geográfica. El presente artículo propone una medida sintética de estacionalidad basada en el índice de Herfindahl-Hirschman con el objeto de comparar los modelos turísticos de la Comunidad Valenciana y del conjunto de España. El resultado de la investigación muestra que el crecimiento de la Comunidad Valenciana supera al del resto de España, aunque también evidencia una mayor dependencia de las fluctuaciones temporales de la demanda estival. Los resultados obtenidos establecen un marco cuantitativo para una planificación turística adecuada por parte de organismos públicos y privados, con el fin de prever con precisión el flujo de visitantes en el territorio y los picos de demanda.

**Palabras clave:** estacionalidad, demanda turística, series temporales, peso relativo, planificación.

## INTRODUCCIÓN

La entrada de turistas internacionales en España ha experimentado una evolución fuertemente positiva, lo que sitúa a España como el segundo país más visitado del mundo en 2024, según la Organización Mundial del Turismo (OMT) [1]. Del mismo modo, el porcentaje del PIB correspondiente al sector turístico es del 12,6% del PIB global, lo que equivale a 200.699 millones de euros, generando 2,78 millones de puestos de trabajo y un porcentaje de 12,3% sobre los datos de ocupación totales [2]. Asimismo, resulta relevante señalar cómo el porcentaje del PIB de la Comunidad Valenciana relacionado con la actividad turística es superior al porcentaje nacional, situándose en el 16%, manteniendo una cifra de empleo superior a los 300.000 trabajadores vinculados directamente al sector turístico INE [2].

Estos datos suponen un reto económico y social para las entidades públicas y privadas, debido a su importancia tanto en términos absolutos como por su repercusión en el tejido empresarial, de forma directa e indirecta. La estacionalidad es un aspecto inherente al modelo turístico de la Comunidad Valenciana, ligado principalmente a factores naturales y económicos. Este fenómeno incide directamente en la gestión y planificación de los destinos turísticos debido a los flujos temporales y sus consecuencias ambientales, estructurales y sociales. Butler establece el concepto de estacionalidad turística como una variable de desequilibrio temporal que provoca impactos socioeconómicos, así como presión sobre la gestión de los recursos naturales y estructurales [3]. Por tanto, los procesos requieren la adecuación de recursos públicos, así como la planificación de infraestructuras de transporte, energéticas e hídricas, entre otras.

El análisis de series temporales permite identificar patrones dinámicos y relaciones temporales a partir de la observación de datos, principalmente económicos, a lo largo

de un periodo [4, 5]. Este artículo se basa en el análisis de series temporales para proponer una medida sintética de estacionalidad mediante el índice de Herfindahl-Hirschmann, cuyo cálculo se ha realizado con los datos provenientes de fuentes oficiales pertenecientes al INE [6]. El resultado de la propuesta permite determinar el grado de dependencia estacional de la Comunidad Valenciana y compararlo con el de España en su conjunto. Como pasos previos, se analiza el peso relativo del mercado turístico valenciano en el mercado nacional español y se calcula un índice de estacionalidad normalizado. En el caso del peso relativo, la Comunidad Valenciana aumenta progresivamente su porcentaje e importancia en España. Sin embargo, la estacionalidad de la Comunidad Valenciana evidencia una mayor dependencia de la época estival, debido a su modelo turístico, basado principalmente en sus recursos costeros.

## OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.

El objetivo principal del presente artículo es proponer una medida sintética de la estacionalidad turística para la Comunidad Valenciana, basada en el índice de Herfindahl-Hirschman (IHH). Con respecto a los objetivos complementarios, en primer lugar, se determina el peso relativo de la Comunidad Valenciana respecto del conjunto de España y, en segundo lugar, se comparan los índices de estacionalidad turística entre la Comunidad Valenciana y España. Para alcanzar estos objetivos, se emplea una metodología basada en el análisis de series temporales. El proceso de selección y obtención de datos se ha realizado mediante la consulta de fuentes oficiales del Instituto Nacional de Estadística (INE) a través del apartado Frontur, donde se refleja la estadística de movimientos turísticos en fronteras [6]. El intervalo temporal analizado abarca desde enero de 2016 hasta diciembre de 2025, con una frecuencia mensual.

## RESULTADOS

### Análisis del peso relativo

El análisis del peso relativo de la demanda turística permite medir el grado de relevancia de una variable geográfica, como el mercado turístico de la Comunidad Valenciana, respecto del mercado nacional en su conjunto. El método para la evaluación del peso relativo utiliza la ratio entre el número de turistas de una zona y otra:

$$p_{tm} = \frac{y_{tm}}{x_{tm}} \quad [1]$$

donde $y_{tm}$ corresponde a la entrada de turistas internacionales de la Comunidad Valenciana en el año *t* y el mes *m*, $x_{tm}$ corresponde a la entrada de turistas internacionales de España en el año *t* y el mes *m.* El rango del año *t* va de 2016 a 2025 y el del mes *m* de 1 a 12.

El peso relativo de la demanda turística de la Comunidad Valenciana respecto al conjunto de España se muestra en el siguiente gráfico, donde el eje vertical indica el ratio o peso relativo y el eje horizontal una escala temporal (Figura 1).

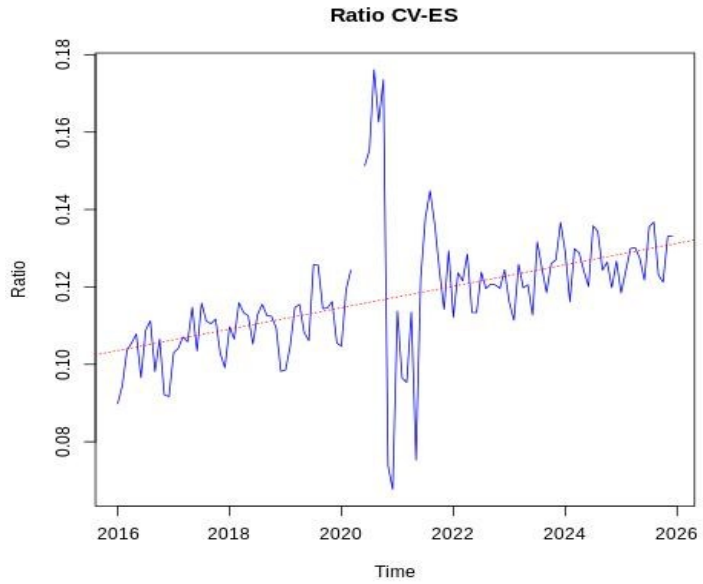



**Figura 1.** Peso relativo de los turistas de la Comunidad Valenciana respecto del total de España.

El modelo presenta una evolución positiva del porcentaje, con un aumento progresivo del peso relativo de la Comunidad Valenciana respecto al total nacional desde el inicio de la serie temporal, que partió del 10% en 2016 y se acerca actualmente al 13%. Este hecho es relevante, considerando que la entrada de turistas en España ha aumentado notablemente, lo que indica que el crecimiento en la Comunidad Valenciana ha sido significativamente mayor.

## Estacionalidad

El estudio de la estacionalidad permite contrastar la estabilidad del flujo de llegada de turistas en distintos territorios. El modelo propuesto para la verificación de la estacionalidad está basado en el cálculo de los siguientes índices:

$$s_m\,(y_{tm}) = \frac{1}{10}\sum_{t=2016}^{2025} y_{tm} \qquad [2]$$

$$z_m\,(y_{tm}) = \frac{s_m\,(y_{tm})}{\frac{1}{12}\,\sum_{m=1}^{12} s_m\,(y_{tm})} \qquad [3]$$

donde $s_m$ es la media mensual de la entrada de turistas para el conjunto de los diez años disponibles y $z_m$ es un índice de estacionalidad normalizado mediante la división por la media de los meses. El modelo se aplica tanto a la Comunidad Valenciana $(y_{tm})$ como para el conjunto de España $(x_{tm})$. De este proceso se desprenden los siguientes

resultados representados en la Figura 2, donde el eje vertical muestra el índice de estacionalidad $z_m$, calculado con la ecuación [3], y el eje horizontal muestra cada uno de los meses del año.

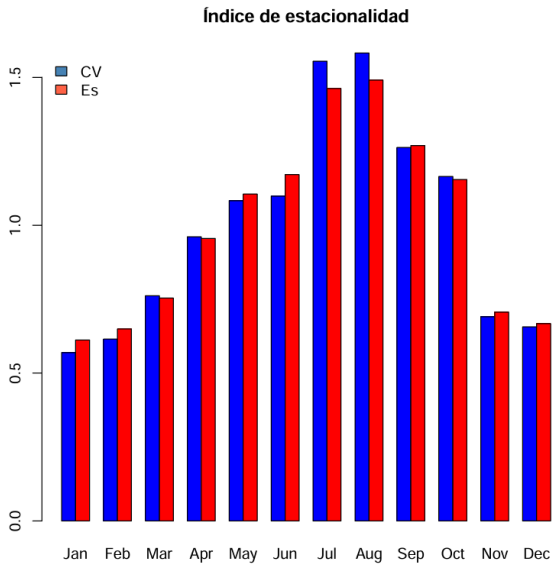



**Figura 2.** Índices de estacionalidad para Comunidad Valenciana y España.

En cuanto a la estacionalidad turística, la Comunidad Valenciana presenta una dependencia turística mayor en los meses estivales que el conjunto de España. Este hecho certifica el interés del turista por los recursos naturales del territorio, principalmente basado en el turismo de costa, lo que marca una divergencia respecto de los meses de baja demanda turística de este concepto. La diferencia más notable, por tanto, se produce en los meses de julio y agosto, en los que la variable presenta una mayor variación.

## Propuesta de medida sintética de estacionalidad

El índice de Herfindahl-Hirschmann ($h$) permite reducir a una única medida sintética el concepto multidimensional de la estacionalidad de una serie temporal que, en el caso de frecuencias mensuales, está compuesto por doce valores. La medida sintética de estacionalidad se obtiene mediante la suma de los cuadrados de los índices de estacionalidad mensual $z_m$ de una serie temporal de entrada de turistas como $y_{tm}$. Los valores elevados de $h$ reflejan menor diversificación y mayor dependencia de la estacionalidad mensual [7].

$$h(y_{tm}) = \frac{1}{12}\sum_{m=1}^{12} z_m^2\,(y_{tm}) \qquad [4]$$

El resultado obtenido para la Comunidad Valenciana $(y_{tm})$ es 1,11, mientras que para España $(x_{tm})$ es 1,09. Este resultado se interpreta como una mayor concentración turística en la Comunidad Valenciana, con una alta estacionalidad, respecto al conjunto de España.

## CONCLUSIONES

Mediante el análisis del peso relativo de la Comunidad Valenciana respecto al resto de España, se desprende que la entrada de turistas en la Comunidad Valenciana representa un peso estructural superior al promedio nacional. Los modelos de series temporales reflejan un patrón turístico actual basado principalmente en los recursos naturales de la costa, con componentes estacionales y cíclicos. La demanda turística de la Comunidad Valenciana está fuertemente marcada por una demanda exógena, así como por una alta estacionalidad. Por otro lado, la propuesta de medida sintética, sustentada por el estudio del índice de Herfindahl-Hirschmann, demuestra cómo la Comunidad Valenciana presenta una estacionalidad más alta que el conjunto del mercado turístico nacional.

Estos resultados sugieren la necesidad de desarrollar, por parte de las administraciones públicas y las propias empresas del sector, un modelo de diversificación basado en una oferta turística de interior, la gastronomía, las actividades culturales, el turismo urbano, y los productos MICE (Meetings, Incentives, Conventions and Events), con el objetivo de provocar un efecto desestacionalizador. Corresponde, por tanto, identificar características de modelos turísticos análogos en próximas investigaciones, con el fin de determinar aspectos comunes y discrepantes que condicionen la movilidad turística.

Trabajo financiado por la Conselleria de Economía, Hacienda y Administración pública de la Generalitat Valenciana. Proyecto TUR-IA (HIECPU/2025/4).

## REFERENCIAS

[1] Organización Mundial del Turismo. *UN data dashboard* https://www.untourism.int/es/onu-turismo-dashboard-datos-turisticos/indicadores-clave-turismo

[2] Instituto Nacional de Estadística. *Cuenta satélite del turismo en España*. Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=estadistica_C&cid=1254736169169&menu=ultiDatos&idp=1254735576863

[3] Butler, R. W. (1980). "The concept of a tourist area cycle of evolution: implications for management of resources". *Canadian Geographer*, 1(24), 5-12.

[4] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). "Forecasting: principles and practice". Melbourne. OTexts. ISBN 9780987507105

[5] Hamilton, J. D. (2020). "*Time series analysis*". Princeton, Princeton University Press. ISBN 9780691042893

[6] Estadística de Movimientos en Frontera. (2026, Marzo 4). *Estadística de movimientos turísticos en frontera*. Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176996&menu=ultiDatos&idp=1254735576863

[7] Pla-Santamaria, D., Bravo, M., Reig-Mullor, J., & Salas-Molina, F. (2021). "A multicriteria approach to manage credit risk under strict uncertainty". *Top*, 29(2), 494-523.

# Integración de indicadores técnicos, fundamentales y espaciales en un portal bursátil interactivo

**Deiros-Romano, Diego[(1)], Mora-Navarro, Gaspar[(2)], Balaguer-Beser, Angel[(3)]**

*(1) Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, ddeirom@doctor.upv.es*

(2) *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría; Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, joamona@cgf.upv.es*

(3) *Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, abalague@mat.upv.es*

## RESUMEN

Los mercados financieros actuales ofrecen un gran volumen de información técnica, financiera y económica, aunque esta disponibilidad no garantiza por sí sola una interpretación adecuada, ni una toma de decisiones eficaz. Esta dificultad se ve reforzada por la diversidad de variables que intervienen en el análisis bursátil y por la fragmentación de muchas herramientas de consulta. El objetivo de este trabajo es desarrollar un portal bursátil interactivo que integre indicadores técnicos, fundamentales y geoespaciales en una única plataforma de análisis visual. Para ello, se implementó una arquitectura cliente-servidor en la que el servidor (backend) descarga, valida y procesa múltiples datos financieros y bursátiles, calcula indicadores y geocodifica empresas. Por su parte que los clientes (frontend) representan los resultados mediante mapas interactivos, gráficos dinámicos y paneles de análisis. Los resultados muestran que el sistema permite reunir en un mismo entorno localización, métricas financieras, señales técnicas, rankings e interpretación automatizada. La aportación principal de este trabajo reside en reducir la fragmentación analítica, y facilitar una lectura más estructurada del mercado mediante una herramienta visual orientada al apoyo analítico.

**Palabras clave:** Portal bursátil; análisis técnico; análisis fundamental; visualización espacial; apoyo a la decisión.

## INTRODUCCIÓN

Los mercados financieros actuales ofrecen un volumen creciente de información técnica y económica. Sin embargo, la abundancia de información no garantiza una mejor comprensión ni decisiones más eficaces, ya que la sobrecarga informativa y la capacidad limitada de procesamiento pueden reducir la precisión de los inversores. Además, persisten diferencias entre inversores institucionales y no institucionales en la adquisición, el procesamiento y la interpretación de la información. Aunque la digitalización y las plataformas financieras amplían el acceso a datos, su aprovechamiento eficaz depende de habilidades financieras y digitales avanzadas.

La interpretación de los datos bursátiles es compleja por la diversidad de variables que intervienen en la evaluación de una empresa. El análisis no depende solo del precio, sino también de indicadores de rentabilidad, liquidez, endeudamiento, valoración y comportamiento técnico. Estas variables no deben interpretarse de forma aislada, y se suelen emplear combinaciones de variables. Además, el análisis empírico del estudio muestra asociaciones relevantes entre varios indicadores, lo que refuerza la conveniencia de una lectura conjunta. Estas variables suelen agruparse en categorías

técnicas, macroeconómicas, fundamentales y complementarias, sin que exista un conjunto único universalmente válido para el análisis del mercado. A esta dificultad se suma la fragmentación de muchas herramientas de consulta. Existen limitaciones cuando la información no se presenta de forma articulada ni adaptada a las necesidades del usuario, lo que puede obligar a combinar distintas herramientas, especialmente en contextos no técnicos. Una representación visual adecuada puede mejorar la comprensión y apoyar decisiones de mayor calidad.

## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un portal bursátil interactivo que integre indicadores técnicos, fundamentales y geoespaciales en una única plataforma de análisis visual, para facilitar la interpretación de información financiera, relacionar la localización de empresas cotizadas con variables financieras y reducir la fragmentación existente entre distintas herramientas de consulta. Se pretende aportar una base metodológica útil para futuras líneas de investigación vinculadas con la automatización analítica y la integración entre finanzas y geoinformación.

## METODOLOGÍA

Se ha desarrollado una metodología para integrar en un único entorno web datos financieros, técnicos y geoespaciales de empresas cotizadas, representando la información bursátil mediante marcadores georreferenciados, gráficos dinámicos y cuadros resumen con interpretación automatizada. El portal permite priorizar y clasificar activos, según criterios definidos, en categorías, como posible compra, venta, o seguimiento, a partir de datos actualizados. Se siguen estos pasos.

1. Se ha utilizado una arquitectura cliente-servidor para automatizar la descarga, procesamiento y organización de datos financieros, bursátiles y geoespaciales.
2. Las empresas cotizadas se han representado espacialmente en un geoportal interactivo, construido con Leaflet.js. El geoportal permite relacionar la localización de las empresas con métricas financieras y señales técnicas relevantes para la toma de decisiones.
3. Se han integrado rentabilidad, solvencia, liquidez, valoración y comportamiento del mercado: ROE, ROA, deuda sobre patrimonio, tesorería neta, PER, rentabilidad por dividendo, RSI, MACD, pendiente de precios y estado de señal MACD.
4. Se han desarrollado visualizaciones dinámicas, que se actualizan diariamente, mediante mapas interactivos, gráficos, paneles laterales y cuadros resumen, orientadas a facilitar la exploración, comparación e interpretación de activos bursátiles.
5. Se han generado rankings e interpretaciones automatizadas, que clasifican empresas según criterios de compra, venta o seguimiento, apoyando el análisis del usuario.

## RESULTADOS

El geoportal muestra la visualización cartográfica de empresas a nivel global (Figura 1). Cada empresa aparece como un marcador, cuya simbología cromática resume de forma inmediata su estado financiero, lo que permite una primera lectura global antes de acceder al detalle individual.

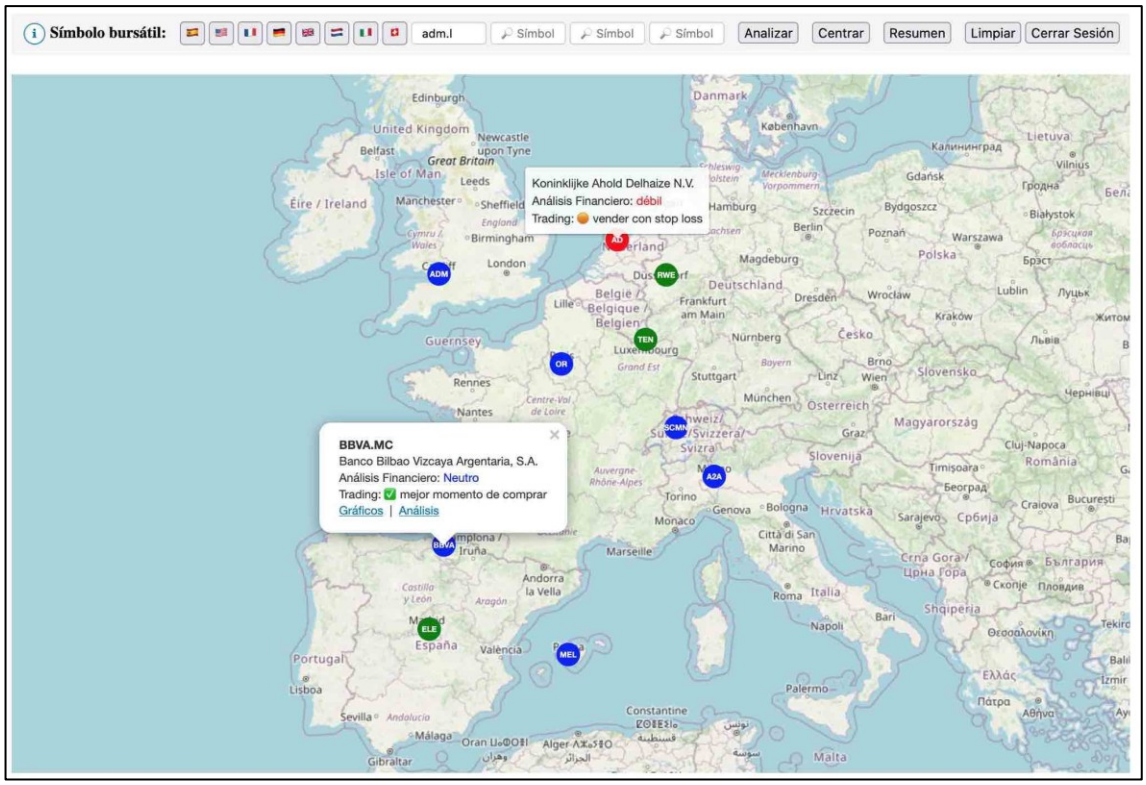



**Figura 1.** Mapa interactivo.

En términos generales, el color verde representa una situación favorable, el azul una situación neutral, y el rojo una situación desfavorable. Cada punto indica la posición geográfica de la empresa, o de su sede corporativa. Además, al interactuar con cada marcador es posible consultar información resumida, y desplegar paneles laterales con datos financieros, técnicos y fundamentales, facilitando comparaciones entre compañías de distintos países y sectores.

A nivel individual, el geoportal muestra gráficos de precios históricos y tendencias (Figura 2), MACD (Figura 3) y RSI (Figura 4). El gráfico de tendencias representa la evolución histórica del precio de cada acción, e identifica la dirección general del activo. Para ello, el sistema detecta picos y valles dentro de la serie temporal de precios. Los picos corresponden a máximos locales, es decir, puntos donde el precio alcanza un valor superior al de los datos próximos, mientras que los valles corresponden a mínimos locales, donde el precio desciende hasta un nivel inferior al de su entorno y posteriormente se recupera. Los picos pueden interpretarse como posibles zonas de resistencia y los valles como posibles zonas de soporte. Sobre estos puntos se calculan líneas de tendencia mediante regresión lineal.

Matemáticamente, el precio se aproxima mediante una recta de la forma $P_t = a + b \cdot t$, donde $P_t$ es el precio en el momento t, a es el valor inicial estimado y b es la pendiente.

La pendiente indica la dirección del comportamiento histórico: si b es positiva, la tendencia es alcista; si es negativa, la tendencia es bajista; y si se aproxima a cero, el comportamiento puede considerarse lateral. De este modo, la regresión sobre picos permite analizar la evolución de las resistencias, mientras que la regresión sobre valles permite observar la evolución de los soportes. Esta representación constituye una herramienta visual de apoyo para interpretar la estructura del mercado y complementar el análisis técnico realizado con MACD y RSI e indicadores fundamentales.

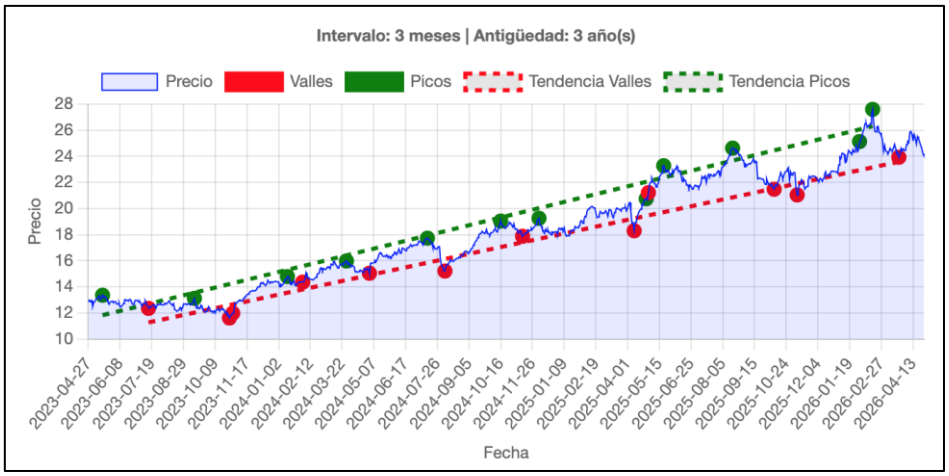



**Figura 2.** Gráfico de Tendencias.

El gráfico Moving Average Convergence Divergence (MACD) identifica cruces alcistas y bajistas. Permite analizar el impulso y posibles cambios de tendencia de una acción. En el sistema, el MACD se calcula a partir de la diferencia entre dos medias móviles exponenciales del precio: una media rápida de 12 periodos y una media lenta de 26 periodos ($MACD_t = EMA_{12,t} - EMA_{26,t}$). La media móvil exponencial se calcula mediante: $EMA_t = P_t\,\alpha + EMA_{t-1}\,(1 - \alpha)$, donde $P_t$ es el precio actual, $EMA_{t-1}$ es el valor anterior de la media y $\alpha = 2 / (n + 1)$ es el factor de suavizado.

La línea de señal, o Signal Line, se obtiene aplicando una media móvil exponencial de 9 periodos al MACD, ($Signal_t = EMA_9(MACD_t)$). Esta línea suaviza el comportamiento del MACD y facilita la detección de cambios relevantes. Cuando el MACD cruza por encima de la línea Signal se produce un cruce alcista, interpretable como mejora del impulso del precio o una posible señal de entrada. Por el contrario, cuando el MACD cruza por debajo de la línea Signal se produce un cruce bajista, asociado a un pérdida de impulso o posible señal de salida. Además, si el MACD es positivo, la media rápida se encuentra por encima de la media lenta, lo que suele reflejar una estructura de impulso favorable. Si el MACD es negativo, la media rápida se sitúa por debajo de la media lenta, lo que puede indicar debilidad o presión bajista. De este modo, el gráfico MACD constituye una herramienta de apoyo para interpretar el momento del activo.

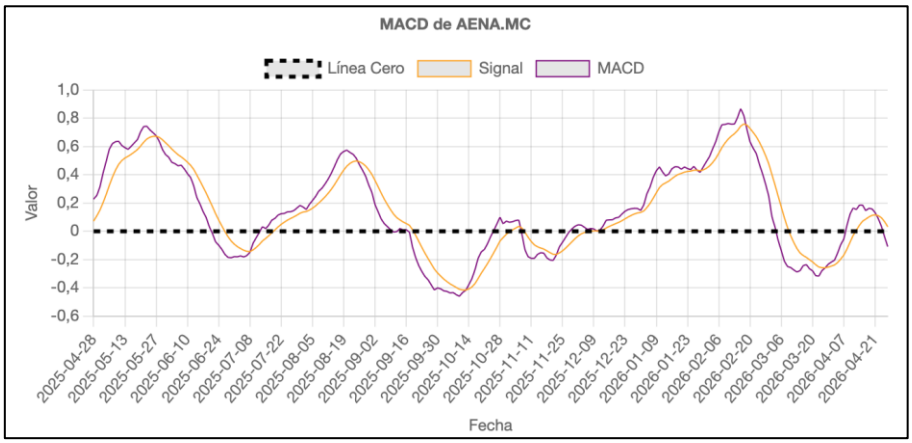



**Figura 3.** Gráfico de MACD

Por otro lado, el gráfico RSI muestra niveles de sobrecompra y sobreventa que ayudan a anticipar posibles cambios de tendencia a corto plazo. Estas visualizaciones constituyen ejemplos concretos de cómo el portal convierte series temporales complejas en señales interpretables para el usuario. Representa la evolución del Índice de Fuerza Relativa o Relative Strength Index, un oscilador técnico utilizado para medir la intensidad del movimiento reciente del precio de una acción. En el sistema, el RSI se calcula a partir de la serie histórica de precios de cierre, transformando las variaciones del precio en un indicador normalizado entre 0 y 100. Para ello, se calcula primero la variación entre precios consecutivos mediante $\Delta P_t = P_t - P_{t-1}$. Las variaciones positivas se consideran ganancias y las negativas se transforman en pérdidas absolutas. El RSI es: RSI = 100 − [100 / (1 + RS)], donde RS = promedio de ganancias / promedio de pérdidas.

Valores elevados del RSI indican que las ganancias recientes han predominado sobre las pérdidas, mientras que valores bajos reflejan una mayor presión bajista. Cuando el RSI supera 70, el activo puede encontrarse en zona de sobrecompra, lo que puede sugerir agotamiento del movimiento alcista o riesgo de corrección. Cuando el RSI cae por debajo de 30, el activo puede encontrarse en zona de sobreventa, lo que puede indicar un descenso intenso y la posibilidad de rebote o estabilización. La pendiente de RSI se estima mediante una regresión lineal de la forma $RSI_t = a + b \cdot t$. Si b es positiva, el RSI muestra recuperación de fuerza, si es negativa, refleja pérdida de impulso y, si se aproxima a cero indica estabilidad.

Los datos procesados en el backend se exportan en formato JSON estructurado y, a partir de ellos, el sistema construye recomendaciones de trading basadas en patrones de precios, MACD, línea de señal (Signal Line) y comportamiento del RSI. Esta funcionalidad permite traducir indicadores cuantitativos en mensajes operativos comprensibles, como comprar, vender o esperar, evitando que el usuario tenga que interpretar cada variable de forma aislada. La recomendación automatizada no se limita a una señal técnica puntual, sino que se apoya en la combinación de gráficos e indicadores. En este sentido, los resultados muestran que la integración entre precios históricos, MACD, RSI y pendiente de precios permite contextualizar mejor la situación del activo y orientar decisiones, como comprar en rebotes, evitar entradas precipitadas, o vender ante señales de debilidad. El mapa facilita explorar activos de distintos países, mientras que los paneles y rankings permiten profundizar en cada empresa, o priorizar el análisis según criterios de compra, venta o seguimiento.

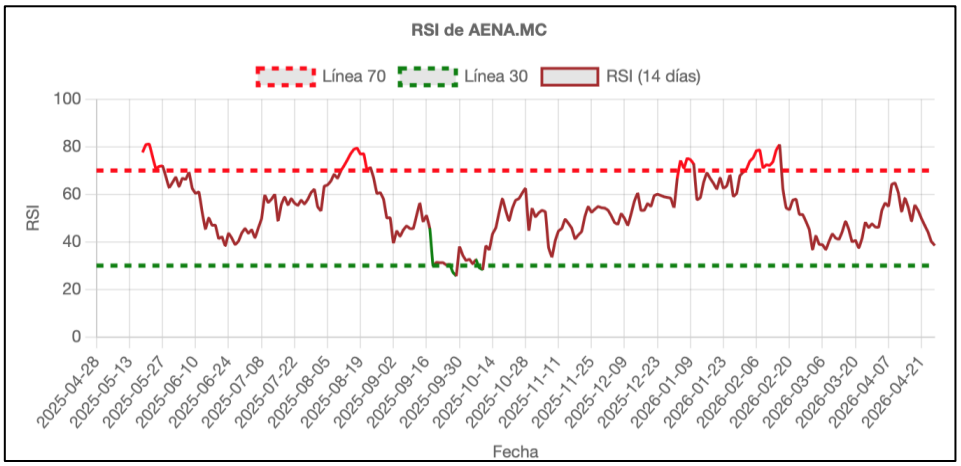



**Figura 4.** Gráfico de RSI.

## CONCLUSIONES

La aportación principal de este trabajo reside en la construcción de una herramienta analítica capaz de combinar en un mismo entorno cartografía interactiva, métricas financieras, señales técnicas, rankings comparativos e interpretación automatizada. El portal ofrece una utilidad analítica potencial para usuarios e inversores, al permitir consultar y comparar empresas desde una doble escala de análisis: una escala agregada, basada en su representación espacial y su clasificación visual, y una escala individual, apoyada en paneles con ratios, gráficos técnicos, y recomendaciones automáticas. Esta integración facilita la exploración de mercados por país, la identificación de oportunidades, y la priorización del análisis según criterios específicos.

En términos funcionales, el sistema ofrece una interfaz accesible, multilingüe y de navegación sencilla, diseñado para presentar información financiera compleja de forma visual y accesible. Esta capacidad de síntesis constituye uno de los principales resultados del trabajo, ya que transforma datos bursátiles heterogéneos en una herramienta de consulta integrada y operativa. Aunque, el sistema no solo visualiza datos, sino que estructura el proceso de análisis y lo hace más transparente, accesible y operativo para inversores y analistas.

Desde una perspectiva práctica, el sistema ofrece valor al usuario porque facilita el acceso a información financiera compleja en un formato estructurado. El portal reduce la necesidad de consultar múltiples plataformas para reconstruir manualmente una visión conjunta del activo, ya que integra localización, ratios, señales técnicas, paneles explicativos y rankings en una sola interfaz. Esta integración puede mejorar la comprensión de la información, y contribuir a decisiones más fundamentadas, especialmente en usuarios no institucionales o con menor capacidad técnica de análisis.

De este modo, este artículo debe entenderse como el punto de partida de una línea de investigación más amplia orientada a la integración entre análisis financiero, visualización geoespacial, y herramientas analíticas accesibles.

# Plataforma web basada en recuerdos personales para la estimulación cognitiva en personas con deterioro cognitivo leve

**Sanjuan, Mario[(1)], Ferri-Molla, Isabel [(1)], Fortunato, Seraphina[(2)], Linares-Pellicer Jordi[(1)]**

(1) *Valencian Research Institute for Artificial Intelligence (VRAIN). Universitat Politècnica de València. (msancan3@epsa.upv.es, isfermol@upv.es, jorlipel@upv.es )*

(2) *Hogeschool Rotterdam, Países Bajos. seraphina.fortunato@gmail.com*

## RESUMEN

El deterioro de las capacidades cognitivas asociadas a enfermedades neurodegenerativas es una de las principales causas de la perdida de autonomía y necesidad de cuidados. Una de las terapias más utilizadas para tratar de mitigar los efectos del deterioro cognitivo es la terapia de reminiscencia. Esta terapia consiste en ejercitar la memoria y capacidades cognitivas a través de experiencias o recuerdos de los pacientes. En este trabajo se propone una plataforma orientada a la estimulación cognitiva de personas mayores con deterioro cognitivo leve usando los principios básicos propuestos por la terapia de reminiscencia. La aplicación, permite crear colecciones de recuerdos mediante imágenes, textos y audios, que serán utilizados para estimular la memoria a partir de experiencias de la vida del usuario. El sistema está diseñado para ser utilizado tanto por los pacientes como por familiares o cuidadores, quienes pueden gestionar el contenido y adaptar la experiencia a las necesidades del usuario. Durante el diseño de la plataforma se ha enfatizado en la accesibilidad y usabilidad, considerando las limitaciones cognitivas, visuales y motoras propias de este colectivo para obtener una herramienta de apoyo que contribuya a mantener o ralentizar el deterioro cognitivo, mejorando su calidad de vida y su autonomía.

**Palabras clave:** Estimulación cognitiva; Interacción humano-máquina; Deterioro cognitivo leve; Terapia de reminiscencia.

## INTRODUCCIÓN

El envejecimiento progresivo de la población supone uno de los principales retos sociales y sanitarios de las próximas décadas [1]. A medida que aumenta la proporción de personas mayores, también crece la incidencia de trastornos asociados al deterioro cognitivo, entre ellos el deterioro cognitivo leve (MCI, por sus siglas en inglés), que se sitúa en una etapa intermedia entre el envejecimiento cognitivo normal y cuadros más avanzados como la demencia [2,3].

Aunque el deterioro cognitivo leve no siempre impide que la persona mantenga una vida relativamente autónoma, sí puede generar dificultades en actividades cotidianas y aumentar la dependencia de familiares o cuidadores [4]. Entre los problemas más frecuentes se encuentran las dificultades para recordar información reciente, la inseguridad al tomar decisiones y la frustración al interactuar con tareas complejas [8,9,10,11,12]. En el ámbito de las intervenciones no farmacológicas, una de las estrategias más utilizadas para apoyar la estimulación cognitiva es la terapia de reminiscencia [17]. Esta aproximación se basa en activar recuerdos personales mediante fotografías, sonidos, relatos,

objetos o experiencias significativas, con el objetivo de reforzar la identidad personal, promover la comunicación y favorecer el bienestar emocional.

En los últimos años, distintos trabajos han explorado el uso de tecnologías digitales para apoyar este tipo de intervención, incluyendo fotografías, música, vídeos, narraciones digitales, aplicaciones móviles y entornos de realidad virtual [18,20]. Por ejemplo, en [19], se propone una versión digital de la terapia de reminiscencia para personas con demencia mediante una aplicación móvil con contenidos personalizados. Los resultados demostraron que la interacción con la aplicación reducía la depresión y aumentaba la participación de los usuarios. Sin embargo, el uso de plataformas digitales en el grupo objetivo de personas con MCI supone un desafío en sí mismo. Entre los principales retos se encuentra el diseño de la interfaz de interacción; interfaces sobrecargadas, textos pequeños, navegación poco clara o elementos interactivos difíciles de identificar pueden reducir significativamente la experiencia del usuario y la eficacia de la plataforma [5,6,7]. Además, muchas herramientas digitales no integran de forma suficientemente clara la gestión colaborativa entre la persona mayor y su entorno de apoyo, a pesar de que familiares y cuidadores suelen desempeñar un papel fundamental en la creación, selección y organización de los recuerdos personales. Por ello, el diseño de herramientas digitales dirigidas a este colectivo debe considerar no solo criterios generales de accesibilidad, sino también las limitaciones cognitivas, visuales, auditivas, motoras y emocionales propias de las personas mayores con deterioro cognitivo leve [13,14,15,16]. Así como adaptarse a la necesidad de apoyo que cada usuario requiere por parte de cuidadores y sus capacidades reales [18,19,20].

En este artículo se propone *MillorIA*, una plataforma web para el desarrollo de terapias basadas en la reminiscencia. La plataforma permite almacenar colecciones de experiencias personales del propio usuario para apoyar la estimulación de la memoria, permitiendo recopilar recuerdos en diferentes modalidades de entrada, organizándolos en un entorno visualmente claro y facilitando su consulta tanto por parte del paciente como por sus familiares o cuidadores. Además, incorpora una estructura de roles diferenciados entre participantes y personas de apoyo, con el fin de adaptar el uso de la herramienta a distintos niveles de autonomía digital.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo consiste en el diseño y desarrollo de una plataforma digital accesible orientada a la estimulación cognitiva en personas mayores con deterioro cognitivo leve, mediante la presentación multimodal de recuerdos personales, con el fin de favorecer el entrenamiento de la memoria en contextos de apoyo asistencial y doméstico. A partir de este propósito, se identifican los principios de diseño que deben guiar la aplicación, los cuales se aplican posteriormente en el diseño de una interfaz clara y estructurada que reduzca la carga cognitiva y facilite la orientación del usuario. Asimismo, se desarrolla un prototipo funcional que permite la creación, visualización y gestión de colecciones de recuerdos personales mediante imágenes, audios y textos. Finalmente, se define una estructura de roles que distingue entre usuarios participantes y personas de apoyo para facilitar el acompañamiento en el uso de la plataforma cuando sea necesario.

## METODOLOGÍA

Para abordar las complejidades de la interacción humano-computadora en el contexto del envejecimiento, se ha adoptado una metodología de diseño centrada en el usuario, informada por un análisis de la literatura existente sobre las dificultades que esta población experimenta al interactuar con interfaces digitales. En primer lugar, diversos estudios han demostrado que las limitaciones sensoriales como la dificultad para leer textos pequeños, distinguir bajo contraste o comprender información solo auditiva, constituyen una barrera fundamental a la hora de interactuar con una interfaz [8,10]. En segundo lugar, los pacientes que padecen MCI suelen mostrar dificultades cognitivas como menor memoria de trabajo, un procesamiento de información más lento o la dificultad para manejar volúmenes excesivos de datos [3,4]. En tercer lugar, las dificultades motoras establecen impedimentos notables, resultando en problemas para pulsar elementos pequeños, ejecutar gestos precisos o completar secuencias de acciones rápidas [11]. Finalmente, la desorientación y la falta de confianza emergen como consecuencias directas de procesos ambiguos, el temor a incurrir en errores o la dificultad para rectificar estos. Para mitigar estas vulnerabilidades, el World Wide Web Consortium (W3C) ha promulgado las Pautas de Accesibilidad al Contenido Web [5] y ha emitido recomendaciones específicas para usuarios mayores y la accesibilidad web [6], con el objetivo de promover un diseño de interfaces que sea simultáneamente intuitivo y reduzca la incertidumbre en la interacción digital, reconociendo que las actitudes y comportamientos hacia la accesibilidad web y el envejecimiento influyen significativamente en la experiencia del usuario [7].

A partir del análisis de la literatura, se han identificado cuatro principios de diseño esenciales, ideados para mitigar las dificultades que enfrentan los adultos mayores en la interacción digital. (i) Para las limitaciones sensoriales, se propone la claridad visual, alto contraste, texto grande, un diseño limpio y acceso multimodal mediante texto, audio y apoyos visuales. (ii) En respuesta a las dificultades cognitivas, se enfatiza la reducción de la carga cognitiva, tareas paso a paso, lenguaje simple, opciones limitadas y terminología consistente. (iii) Ante las dificultades motoras, el diseño debe incorporar botones grandes, elementos bien espaciados, interacción simple y ausencia de gestos complejos. (iv) Finalmente, para abordar la desorientación y la falta de confianza, es fundamental implementar una navegación predecible, indicadores de progreso, mensajes claros, confirmaciones y ausencia de presión temporal.

## RESULTADOS

En base a los principios de diseño se diseñó la plataforma MillorIA la cual incorpora un sistema de acceso basado en roles, que permite diferenciar entre el perfil de paciente y el perfil de cuidador. Esta separación permite adaptar las funcionalidades disponibles a las necesidades y capacidades de cada tipo de usuario.Cuando el usuario accede como paciente, la plataforma muestra la vista de galería de recuerdos como se ve en la *Figura 1*. En esta sección, los recuerdos se presentan mediante una galería visual compuesta por una imagen y un título. Al seleccionar un recuerdo, el paciente puede acceder a una vista ampliada que incluye la imagen, una descripción textual y un audio asociado. Este audio puede contener la voz del propio paciente o de sus familiares, explicando el recuerdo y reforzando así la dimensión personal y emocional de la experiencia.

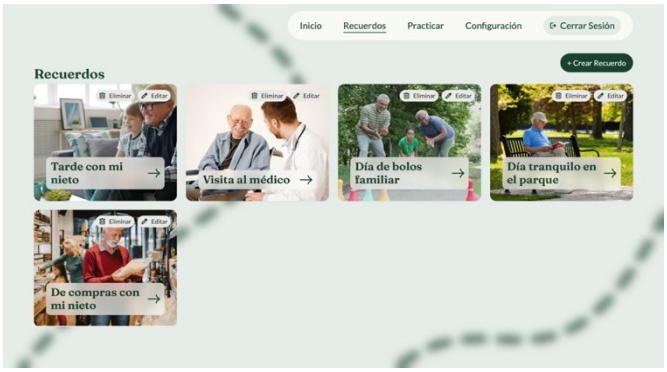



*Figura 1. Interfaz de la galería de recuerdos de MillorIA*

Por otro lado, el perfil de cuidador incluye una vista de configuración desde la que es posible administrar varios pacientes. En esta vista, el cuidador puede gestionar los perfiles asociados y decidir si cada paciente tiene permiso para crear, editar o eliminar nuevos recuerdos, en función de sus capacidades cognitivas y funcionales. De este modo, la plataforma permite ajustar el nivel de autonomía del paciente sin eliminar el acompañamiento del cuidador. Para reducir la complejidad de la creación de nuevos recuerdos, el proceso se organiza en tres pasos simples, como se muestra en la *Figura 2*. En primer lugar, el usuario sube una fotografía relacionada con el recuerdo. En segundo lugar, introduce un título y una descripción breve. Finalmente, puede subir o grabar un audio en el que se narra el recuerdo, permitiendo que posteriormente el paciente pueda escucharlo dentro de la plataforma. En conjunto, esta estructura busca combinar autonomía, apoyo familiar y simplicidad de uso.




*Figura 2. Proceso de creación de nuevos recuerdos*

Desde el punto de vista técnico, MillorIA se desarrolló como una plataforma web basada en React[1], con una interfaz modular e interactiva, y una base de datos relacional implementada con Supabase[2] para gestionar usuarios, roles, recuerdos y contenido multimedia. La evaluación con usuarios de apoyo siguió un proceso iterativo de cocreación centrado en la usabilidad, contando con 15 usuarios con el rol de cuidador. Los participantes realizaron tareas representativas como crear recuerdos, navegar entre secciones, cambiar de participante o localizar ajustes, a partir de las cuales se identificaron los princi-

[1] https://es.react.dev/reference/react

[2] https://supabase.com/

pales problemas de uso y se incorporaron mejoras progresivas al diseño. Entre los hallazgos más relevantes destacaron: la dificultad para identificar el perfil activo al cambiar de participante, la ambigüedad de etiquetas de navegación genéricas como "Crear", la falta de orientación contextual tras realizar ciertas acciones, y la localización deficiente de funciones en la zona de ajustes. Como respuesta, se simplificaron las interacciones, se añadieron títulos visibles en cada pantalla, se sustituyeron etiquetas ambiguas por denominaciones más específicas, como "Crear recuerdo" o "Personas a las que apoyas" y se reorganizó la jerarquía de información, mejorando así la orientación general del usuario dentro de la plataforma.

## CONCLUSIONES

El resultado principal de este trabajo es un prototipo funcional de plataforma web accesible orientada a la estimulación cognitiva mediante recuerdos personales y terapia de reminiscencia. La plataforma permite registrar usuarios con roles diferenciados, vincular participantes con personas de apoyo, crear y visualizar colecciones de recuerdos, y gestionar información de perfil. El proceso evidenció que, para este perfil de usuarios, la claridad de la interfaz resulta un desafío técnico importante. Las decisiones de cocreación se centraron en simplificar la navegación, reforzar la orientación contextual y aumentar la visibilidad de las acciones principales. Como trabajo futuro, se plantea ampliar la evaluación con más usuarios en contextos reales y realizar una validación clínica que permita estudiar su impacto en la estimulación cognitiva y el bienestar. MillorIA constituye así una propuesta que integra interacción humano-máquina, accesibilidad y diseño emocional al servicio del envejecimiento activo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Generalitat Valenciana, a través de las ayudas CIACIF/2022/098.

## REFERENCIAS

[1] He, W.; Goodkind, D.; Kowal, P. (2016). *An Aging World: 2015 International Population Reports*. U.S. Census Bureau, P95/16-1. https://www.researchgate.net/profile/PaulKowal/publication/299528572_An_Aging_World_2015/

[2] World Health Organization. (2017). Global action plan on the public health response to dementia 2017–20. https://www.who.int/publications/i/item/9789241513487

[3] Anderson, N. D. (2019). *State of the science on mild cognitive impairment (MCI)*. CNS Spectrums, 24(1), 78–87. https://doi.org/10.1017/S1092852918001347

[4] *Mayo Clinic. (2024).* Deterioro cognitivo leve: síntomas y causas*. Mayo Clinic.* https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/mild-cognitive-impairment/symptoms-causes/syc-20354578

[5] World Wide Web Consortium. (2018). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. https://www.w3.org/TR/WCAG21/

[6] World Wide Web Consortium. (2025). *Older Users and Web Accessibility: Meeting the Needs of Ageing Web Users*, https://www.w3.org/WAI/older-users/developing

[7] Gilbertson, T. (2015). "Attitudes and behaviours towards web accessibility and ageing". *Gerontechnology*, v. 13, n. 3, p.p. 337-344, https://doi.org/10.4017/gt.2015.13.3.004.00

[8] Owsley, C.; Sekuler, R.; Siemsen, D. (1983). "Contrast sensitivity throughout adulthood". *Vision Research*, https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90210-9

[9] Owsley, C. (2011). "Aging and vision". *Vision Research*, v. 51, n. 13, p.p. 1610-1622, https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.020

[10] Deal, J. A.; Betz, J.; Yaffe, K.; Harris, T.; Purchase-Helzner, E.; Satterfield, S.; Pratt, S.; Govil, N.; Simonsick, E. M.; Lin, F. R. (2017). "Hearing Impairment and Incident Dementia and Cognitive Decline in Older Adults: The Health ABC Study". *The Journals of Gerontology: Series A*. https://doi.org/10.1093/gerona/glw069

[11] Keates, S.; Trewin, S. (2005). "Effect of age and Parkinson's disease on cursor positioning using a mouse". En: *Proceedings of the 7th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, https://doi.org/10.1145/1090785.1090800

[12] Salthouse, T. A. (1996). "The processing-speed theory of adult age differences in cognition". *Psychological Review*, v. 103, n. 3, p.p. 403-428. https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.3.403

[13] Haesner, M.; Chandra, J.; Steinert, A.; Steinhagen-Thiessen, E. (2017). "Eye movement analysis of web usability in MCI", https://doi.org/10.1080/10400435.2016.1251994

[14] Jokisuu, E.; Langdon, P.; Clarkson, P. J. (2011). "Modelling Cognitive Impairment to Improve Universal Access". En: *Universal Access in Human-Computer Interaction*, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21663-3_5

[15] Castilla, D.; Garcia-Palacios, A.; Miralles, I.; Breton-Lopez, J.; Parra, E.; Rodriguez-Berges, S.; Botella, C. (2018). "Teaching digital literacy skills to the elderly using linear navigation". *International Journal of Human-Computer Studies*, v. 118, p.p. 24-37., https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.05.009

[16] Castilla, D.; Suso-Ribera, C.; Zaragoza, I.; et al. (2020). "Designing ICTs for Users with Mild Cognitive Impairment". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 14. https://www.mdpi.com/1660-4601/17/14/5153

[17] Woods, B.; O'Philbin, L.; Farrell, E.; Spector, A.; Orrell, M. (2018). "Reminiscence therapy for dementia". Cochrane Database of Systematic Reviews. https://doi.org/10.1002/14651858.CD001120.pub3

[18] Lazar, A.; Thompson, H.; Demiris, G. (2014). "A Systematic Review of the Use of Technology for Reminiscence Therapy". *Health Education & Behavior*, v. 41, n. 1_suppl, p.p. 51S-61S. https://doi.org/10.1177/1090198114537067

[19] Moon, S.; Park, K. (2020). "The effect of digital reminiscence therapy on people with dementia: a pilot randomized controlled trial". *BMC Geriatrics*, v. 20, article 166. https://doi.org/10.1186/s12877-020-01563-2

[20] Mao, Q.; Zhao, Z.; Yu, L.; Zhao, Y.; Wang, H. (2024). "The Effects of Virtual Reality–Based Reminiscence Therapies for Older Adults With Cognitive Impairment: Systematic Review". *Journal of Medical Internet Research*, v. 26, e53348. https://doi.org/10.2196/53348

# Fronteras digitales y derechos humanos: la protección de los migrantes en la era del algoritmo y de las nuevas tecnologías

**Cianconi, Denis** (1)

(1) *Programa de Doctorado en Ciencias Sociales y Jurídicas, Universidad Miguel Hernández de Elche. denis.cianconi@goumh.umh.es*

## RESUMEN

El presente trabajo analiza el impacto de las tecnologías y de los sistemas de inteligencia artificial en la gestión de los fenómenos migratorios y en el control de las fronteras europeas. La evolución de las *smart borders*, basadas en sistemas biométricos, interoperabilidad de bases de datos y procesos automatizados de toma de decisiones, ha transformado progresivamente al migrante en un sujeto "dataficado", sometido a prácticas de vigilancia y perfilado preventivo. A través del análisis de casos de estudio significativos — entre ellos iBorderCtrl, SARI, FaceBoarding, el visa streaming británico y la externalización de los controles migratorios en los países ECOWAS — el trabajo pone de relieve los riesgos derivados del uso de algoritmos opacos, conjuntos de datos no representativos y sistemas biométricos de alta intensidad tecnológica. Estas herramientas pueden generar discriminación, reforzar vulnerabilidades estructurales y comprometer derechos fundamentales como la privacidad, la protección de datos personales, la libertad de circulación y el derecho de defensa. El análisis se centra además en el marco normativo europeo, con especial referencia al Reglamento (UE) 2016/679, al Reglamento (UE) 2024/1689 y a la jurisprudencia europea, destacando la necesidad de equilibrar innovación tecnológica, seguridad y protección efectiva de los derechos fundamentales de los migrantes.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial, fronteras digitales, datos biométricos, migrantes, derechos fundamentales, RGPD, AI Act, Law Enforcement Directive.

## INTRODUCCIÓN

La gestión de los flujos migratorios se encuentra en la actualidad profundamente transformada por el uso masivo de tecnologías digitales e inteligencia artificial (IA). Aunque las migraciones son reconocidas en la Agenda 2030 [1] como un factor de desarrollo económico y cohesión social, las políticas adoptadas en la Unión Europea continúan estructurándose según una lógica de emergencia y control, privilegiando las exigencias de seguridad sobre un enfoque orientado a la integración y al respeto de los derechos fundamentales [2].

En este contexto, el equilibrio entre innovación tecnológica y protección de los derechos humanos constituye una cuestión central del debate contemporáneo. Herramientas como los sistemas biométricos, los algoritmos predictivos, el reconocimiento facial, los drones y las pulseras GPS están siendo desplegadas en las fronteras europeas y extraeuropeas, planteando interrogantes fundamentales sobre la relación entre ser humano y máquina, la autonomía de los sistemas automatizados, el control humano y la atribución de responsabilidades jurídicas [3].

Las denominadas *smart borders*, es decir, sistemas en los que la biometría, la automatización y la vigilancia de datos transforman el cuerpo del migrante en el principal objeto de control, instaurando una lógica de *dataveillance* basada en la recopilación y el análisis masivo de datos [4]. Se configura así una nueva forma de vulnerabilidad del migrante, convertido en dato y evaluado mediante inferencias probabilísticas que condicionan su acceso a derechos, movilidad y protección [5].

## METODOLOGIA

La presente comunicación adopta un enfoque metodológico de carácter jurídico-comparativo, combinando el análisis doctrinal del marco normativo europeo con el estudio de casos concretos. En una primera fase, se ha procedido al examen sistemático de las fuentes normativas relevantes — en particular el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), el Reglamento europeo de inteligencia artificial (IA Act) y la Directiva Law Enforcement Directive (LED) — así como de la jurisprudencia del Tribunal de Justicia de la Unión Europea y del Tribunal Europeo de Derechos Humanos en materia de datos biométricos y vigilancia automatizada. En una segunda fase, se han seleccionado seis casos de estudio representativos de distintos contextos geográficos e institucionales — europeo, nacional y extraterritorial, entendiendo por este último aquellos contextos situados fuera del territorio de la Unión Europea pero vinculados a las políticas europeas de control migratorio — con el fin de contrastar las garantías formalmente reconocidas con su aplicación práctica. La selección de los casos responde a criterios de relevancia jurídica, impacto sobre los derechos fundamentales y diversidad tipológica de los sistemas tecnológicos implicados. Este enfoque permite identificar las tensiones estructurales entre innovación tecnológica y protección de los derechos humanos, así como las brechas existentes entre el marco normativo vigente y la tutela efectiva de los migrantes en situación de vulnerabilidad.

## OBJETIVOS

La presente comunicación persigue los siguientes objetivos:

a) Analizar el impacto del uso de sistemas algorítmicos y tecnologías biométricas en los derechos fundamentales de los migrantes, con especial atención a los riesgos de discriminación, opacidad y ausencia de control humano efectivo.

b) Examinar, a través de casos de estudio concretos, las implicaciones prácticas de dichas tecnologías en la gestión migratoria a nivel europeo y extraeuropeo.

c) Evaluar la adecuación del marco normativo vigente — en particular el RGPD y el AI Act — para gobernar los riesgos derivados de la vigilancia automatizada en las fronteras.

d) Identificar las brechas existentes entre las garantías formalmente reconocidas y su efectiva accesibilidad para sujetos en situación de vulnerabilidad estructural.

## CASOS DE ESTUDIO

El proyecto iBorderCtrl (UE, 2018) combinó herramientas de recogida de datos con un mecanismo automatizado de detección del engaño basado en microexpresiones faciales y análisis de la voz. Las críticas señalaron la ausencia de consenso científico sobre la inferencia del engaño a partir de señales biométricas, la escasa

representatividad de los datos y la falta de transparencia, sobre el acceso a los documentos del proyecto [6].

En Italia, el sistema SARI de reconocimiento facial opera sobre la base de datos AFIS, que incluye no solo personas investigadas sino también migrantes registrados con fines administrativos. La Autoridad Italiana de Protección de Datos, mediante el Provvedimento n.º 164 de 12 de marzo de 2026, declaró ilícito el tratamiento de datos biométricos de pasajeros del aeropuerto de Milán Linate mediante el sistema "FaceBoarding", por violación del RGPD y de las directrices del European Data Protection Board (EDPB). Al sistema SARI se le detectaron graves deficiencias, concretamente: almacenamiento centralizado sin control del interesado, falta de cifrado de plantillas biométricas, plazos de conservación excesivos y captura de datos sin consentimiento en los denominados "accesos híbridos" [7].

En España, en la gestión de las llegadas a las Islas Canarias, se han documentado prácticas controvertidas como el uso de *software* Cellebrite para acceder a teléfonos móviles de migrantes sin autorización judicial y la adquisición de tecnologías de empresas israelíes, cuya continuidad ha sido cuestionada tras el embargo sobre armas israelíes introducido en septiembre de 2025 [8].

El caso Glukhin presentado ante el Tribunal Europeo de Derechos Humanos (TEDH) ilustró cómo el reconocimiento facial y la videovigilancia pueden vulnerar el derecho a la vida privada (art. 8 CEDH) cuando el marco normativo nacional carece de garantías adecuadas [9].

Cabe destacar también el sistema de "*visa streaming*" del Reino Unido que asignaba puntuaciones de riesgo en función de la nacionalidad, generando efectos discriminatorios contra solicitantes de África, Asia y Oriente Medio. Suspendido en 2020, este caso demuestra cómo los algoritmos pueden reproducir desigualdades existentes cuando operan de forma opaca, debilitando el derecho a la motivación y a la impugnación [10].

En África occidental, la externalización de las políticas migratorias de la UE a través del Fondo Fiduciario de Emergencia ha convertido a países como Níger, Senegal o Malí en actores del control migratorio europeo, en un intercambio asimétrico que ha sido interpretado como "neocolonialismo digital" [11].

## EL MARCO NORMATIVO EUROPEO

El RGPD prohíbe el tratamiento de datos biométricos salvo excepciones basadas en el interés público y la proporcionalidad. Sus principios —licitud, transparencia, minimización de datos y limitación de la finalidad — constituyen la base normativa para el uso responsable de estas herramientas en los controles fronterizos. Además, el artículo 22 consagra el principio de no exclusividad algorítmica, es decir, las decisiones con efectos significativos no pueden basarse exclusivamente en tratamientos automatizados, debiendo garantizarse la intervención humana y la posibilidad de impugnación.

Por otra parte, el AI Act clasifica los sistemas biométricos como de alto riesgo e introduce obligaciones estrictas de transparencia, evaluación de impacto y supervisión humana. Sin embargo, su ámbito de aplicación se limita al territorio de la Unión, permitiendo que sistemas calificados como prohibidos sean desarrollados y comercializados en terceros países. En la misma línea que el AI Act, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea ha impuesto una interpretación restrictiva del principio de necesidad (asuntos C-560/14, C-

69/21, C-205/21), mientras que el Tribunal Europeo de Derechos Humanos ha reiterado que cualquier injerencia en la vida privada debe respetar los criterios de legalidad, necesidad y proporcionalidad.

## ANALISIS

El uso de tecnologías de recogida de datos en las fronteras responde al objetivo de reforzar el control de los flujos migratorios. A partir de esta información, las autoridades deciden si permitir o denegar la entrada en la Unión Europea. Este proceso afecta a distintas categorías de personas como son los solicitantes de asilo, los migrantes irregulares y los nacionales de terceros Estados con visado de corta duración.

Los sistemas algorítmicos incorporan y amplifican relaciones de poder y sesgos preexistentes mientras que las limitaciones científicas, los conjuntos de datos no representativos y la opacidad algorítmica generan riesgos concretos de discriminación. La datificación del migrante lo transforma en un "conjunto de datos" susceptible de análisis y control, exponiéndolo a una doble dimensión de vulnerabilidad: una ontológica (*precariousness*) y una socialmente producida (*precarity*).

## RESULTADOS

El análisis permite identificar una brecha estructural entre las garantías formalmente reconocidas y su efectiva accesibilidad para los migrantes. Se evidencian cuatro tensiones principales:

1. Opacidad algorítmica vs. derecho a la motivación. Los sistemas de *machine learning* generan decisiones difícilmente explicables, impidiendo al migrante conocer y contestar los criterios que determinan su situación jurídica [12].

2. Interoperabilidad vs. principio de limitación de la finalidad. La creciente conectividad entre bases de datos (SIS, EURODAC, VIS, EES, ETIAS) favorece fenómenos de *function creep*, con reutilización de datos para finalidades distintas de las originalmente previstas [13].

3. Externalización vs. protección extraterritorial. El desplazamiento del control migratorio hacia terceros países reduce la efectividad del marco normativo europeo, creando zonas de impunidad donde los derechos fundamentales quedan desprotegidos [14].

4. Sesgo algorítmico vs. prohibición de discriminación. El uso de datos *proxy* como la nacionalidad o el origen étnico en sistemas de perfilado genera discriminación indirecta, difícilmente detectable en ausencia de transparencia [15].

En resumen, los mecanismos de tutela existentes — acceso, rectificación, supresión, recurso — resultan de difícil ejercicio para los migrantes, especialmente en situaciones de vulnerabilidad lingüística, tecnológica y jurídica. La efectividad del control humano sobre los sistemas automatizados es frecuentemente formal, ya sea por la opacidad de los modelos de *machine learning* o por la tendencia de los funcionarios a confiar acríticamente en las decisiones de la máquina (*automation bias*).

## CONCLUSIONES

La digitalización de las fronteras no es un fenómeno técnicamente neutro ya que los sistemas algorítmicos incorporan y amplifican relaciones de poder preexistentes,

contribuyendo a redefinir las categorías de pertenencia y los límites de la comunidad política. Sin embargo, la supuesta objetividad del algoritmo legitima prácticas de control intensivo bajo una lógica de "inclusión excluyente", en la que el migrante es formalmente incluido en el sistema pero sustancialmente colocado en una condición de excepción permanente.

El marco normativo europeo — RGPD, AI Act, LED — ofrece instrumentos relevantes, pero presenta fragilidades estructurales en su aplicación como son las amplias excepciones vinculadas a la seguridad, la interoperabilidad de los sistemas y los márgenes de discrecionalidad nacional que alimentan el riesgo de una progresiva normalización de la vigilancia biométrica. A ello se suma la dimensión extraterritorial, que permite que sistemas prohibidos en la UE sean desplegados en terceros países mediante mecanismos de externalización.

La efectividad de las garantías dependerá no solo de la calidad de las normas, sino de su aplicación concreta por parte de autoridades nacionales, jueces e instituciones de control. Es imprescindible garantizar que el desarrollo tecnológico mantenga una referencia firme a la centralidad de la persona, evitando enfoques meramente funcionales. Al mismo tiempo, resulta necesario reforzar los espacios de deliberación pública y la participación de la sociedad civil, incluidos los propios migrantes, en los procesos de adopción e implementación de tecnologías de vigilancia.

En ausencia de tales garantías, el riesgo es consolidar una gobernanza de las migraciones orientada predominantemente al control, en la que los migrantes son reducidos a objetos de clasificación algorítmica, con implicaciones relevantes para la protección de los derechos fundamentales y para el equilibrio general del Estado de Derecho.

## REFERENCIAS

[1] United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (Target 10.7). https://sdgs.un.org/2030agenda

[2]Hansen. F, & Pettersson. J, (2021), Contradictory migration management? Differentiated security approaches to visa overstay and irregular border crossings in the European Union. European Security, 31(1), 117-134.

[3] L. Brandner, S. Hirsbrunner, Algorithmic fairness in police investigative work. Ethical analysis of machine learningmethods for facial recognition, in TATuP – Journal for Technology Assessment in Theory and Practice.

[4] Fineman. M, (2020), Reasoning from the Body: Universal Vulnerability and Social Justice, in Dietz. C, Travis. M, Thomson. M, (eds.), A Jurisprudence of the Body, London.

[5] Macioce. F, (2021), La vulnerabilità di gruppo, Torino.

[6] L. Dinges, et al, Exploring facial cues: automated deception detection using artificial intelligence, in Neural Computing and Applications, 2024, 1-27.

[7] Nobile, R. (2024). La vulnerabilità del migrante nell'era delle smart-borders e delle tecnologie lie-detecting.

[8] Wierzbicka, M. A., de Lacerda, L. F., Bautista, J., Mena, N., & Fanjul, G. (2026). Fronteras" inteligentes", democracias negligentes.

[9] Barkane, I., & Buka, L. (2025). Prohibited AI surveillance practices in the Artificial Intelligence Act: promises and pitfalls in protecting fundamental rights. In Critical Perspectives on Predictive Policing (pp. 110-129). Edward Elgar Publishing.

[10] A. Raza, "Navigating the intersection of artificial intelligence and law in healthcare: complications and corrections," 2024.

[11] Philippa Osim Inyang (2025) AI-driven border surveillance in ECOWAS: implications for migrants' rights and data privacy in the age of cyber sovereignty, Politikon, 52:3-4, 365-384.

[12] Krommendijk, J. (2026). Human Rights Law: Relevant or Redundant in Regulating AI?. Available at SSRN 6286118.

[13] Couldry, Nick & Mejias, Ulises A. "The Costs of Connection: How Data Are Colonizing Human Life and Appropriating It for Capitalism". Social Forces. Vol 99, Issue 1, Page e6. Septiembre 2020.

[14] Privacy International. 2019. The Future of the EU Trust Fund for Africa. London: Privacy International. Accessed June 15, 2025. https://privacyinternational.org/sites/default/files/2019-09/EUTF%20 Policy%20Briefing.pdf.

[15] Krommendijk, J. (2026). Human Rights Law: Relevant or Redundant in Regulating AI?. Available at SSRN 6286118.

# Volatilidad no estacionaria del mercado eléctrico español: análisis mediante modelo GARCH dinámico

**Veloso Castello, David[(1)], García Díaz, J. Carlos [(1)]**
*(1) Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de València, davecas1@doctor.upv.es, juagardi@eio.upv.es*

## RESUMEN

El presente trabajo examina la volatilidad del mercado eléctrico español perteneciente al Mercado Ibérico de Electricidad (MIBEL) durante 2022-2023, un período marcado por la inestabilidad geopolítica que amplificó la crisis energética. Durante este periodo también se implementaron acciones regulatorias para mitigar dicho impacto. Se aplica un modelo GJR-GARCH con parámetros variables en el tiempo (TV-GJR-GARCH) que distingue entre la varianza determinista a largo plazo y la varianza condicional a corto plazo. Los resultados revelan un cambio notable en la volatilidad en torno a octubre de 2023, indicando un cambio hacia un régimen de mayor volatilidad. A pesar de la reducción en los precios en 2023, la volatilidad aumentó un 77%, impulsada por una mayor penetración de energías renovables, un clima inusualmente cálido y la recuperación del suministro nuclear francés. Estos hallazgos demuestran que los modelos TV-GARCH capturan la volatilidad durante cambios estructurales de manera más eficaz que los modelos GARCH convencionales.

**Palabras clave:** Volatilidad, GARCH, TV-GARCH, Mercado Ibérico de Electricidad

## INTRODUCCIÓN

El sector energético europeo experimentó una profunda transformación entre 2022 y 2023, impulsada por crisis geopolíticas y cambios regulatorios. El año 2022 estuvo definido principalmente por el conflicto ruso-ucraniano, que agravó una crisis energética preexistente surgida durante la recuperación postpandémica de 2021. Las sanciones internacionales al gas ruso provocaron subidas de precios sin precedentes en el Title Transfer Facility (TTF), el índice de referencia europeo del gas. Este pico desencadenó graves presiones inflacionistas en toda la eurozona, obligando a los gobiernos nacionales a implementar intervenciones de emergencia para proteger a los consumidores industriales y domésticos.

En la Península Ibérica, los gobiernos español y portugués respondieron introduciendo la "Excepción Ibérica", un mecanismo regulatorio único diseñado para desacoplar los precios de la electricidad de la volatilidad del mercado del gas. Esta medida fue facilitada por el alto grado de integración dentro del Mercado Ibérico de Electricidad (MIBEL). Establecido en 2004, el MIBEL opera como un sistema sincronizado gestionado por dos entidades: OMIE (Operador Mercado Ibérico Polo Español), que supervisa el mercado spot, y OMIP (Operador Mercado Ibérico Polo Portugués), que gestiona el mercado de derivados. Si bien el "tope al precio del gas" mitigó con éxito los picos extremos de precios, su impacto en la eficiencia del mercado a largo plazo sigue siendo objeto de intenso debate académico [1,2]

En 2023, el mercado entró en una nueva fase caracterizada por una bajada de precios y un aumento significativo en la penetración de energías renovables. Sin embargo, esta

transición hacia una mezcla descarbonizada coincidió con reformas del Mercado Eléctrico de la UE y la implementación de nuevos estándares técnicos, como los intervalos de 15 minutos. Estos desarrollos alteraron el perfil de riesgo del mercado; aunque los precios medios cayeron, la frecuencia e intensidad de los episodios de volatilidad aumentaron.

A pesar de la relevancia de estos eventos, los modelos econométricos tradicionales a menudo no logran capturar las dinámicas no lineales en periodos de fuerte cambio [3] Este estudio aborda esta brecha empleando un marco TV-GJR-GARCH para analizar la volatilidad del MIBEL. Al tener en cuenta tanto la naturaleza variable en el tiempo de la varianza incondicional como la respuesta asimétrica a los shocks del mercado, esta investigación proporciona una evaluación cuantitativa de cómo los shocks redefinieron la estructura de riesgo del mercado eléctrico español durante 2022 y 2023.

## OBJETIVOS

Este estudio persigue tres objetivos principales:

Primero, analiza el mercado eléctrico español durante el período 2022-2023, un marco temporal que no ha sido examinado de forma independiente en la literatura existente para el caso español. Segundo, implementa el modelo GARCH variable en el tiempo (TV-GARCH) y compara su desempeño con las especificaciones clásicas GARCH y GJR-GARCH. Tercero, examina si hubo un cambio significativo en los parámetros GARCH durante este período.

## MÉTODOS

El modelo GARCH introducido por [4] extiende el modelo ARCH de [5] al permitir una representación más parsimoniosa de las dinámicas de varianza condicional. Desde su introducción, la literatura GARCH se ha expandido sustancialmente, dando lugar a una amplia gama de extensiones del modelo [6]. Este desarrollo está impulsado principalmente por la incapacidad del modelo GARCH estándar para modelar la asimetría de la volatilidad ante shocks positivos y negativos, un hecho estilizado comúnmente observado en las series temporales financieras [7]. Para abordar esta limitación, se han propuesto varias especificaciones asimétricas, incluyendo el modelo GJR-GARCH [8], el modelo TGARCH [9] y el modelo EGARCH [10]. Más recientemente en el trabajo [11,12] introdujeron un modelo GARCH Variable en el Tiempo que permite cambios suaves en las dinámicas de volatilidad a lo largo del tiempo, y este modelo ha sido implementado en un paquete de R por [13].

El modelo GARCH(p,q) se define como:

$$\boldsymbol{\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_i e_{(t-i)}^2 + \sum_{j=1}^{p} \beta_i \sigma_{(t-j)}^2} \quad (1)$$

Con las siguientes restricciones:

$$\boldsymbol{\omega > 0;\ \alpha_i \geq 0;\ \beta_j \geq 0;\ (\alpha_i + \beta_j) \leq 1} \quad (2)$$

ω representa la volatilidad media. Los parámetros $\alpha_i$ corresponden al componente ARCH y capturan el impacto de los shocks inmediatos, mientras que $\beta_j$ son los parámetros GARCH que modelan la persistencia de la volatilidad. La suma de todos los $\alpha_i$ y $\beta_j$ garantiza la estabilidad del proceso.

El modelo GJR-GARCH se define de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^{q} \alpha_i e_{(t-i)}^2 + \sum_{j=1}^{p} \beta_i \sigma_{(t-j)}^2 + \sum_{i=1}^{q} \gamma_i e_{(t-i)}^2 I_{(t-1)}^-} \quad (3)$$

El modelo GJR-GARCH puede verse como una variación del modelo GARCH clásico de la ecuación (1), incorporando un parámetro adicional y una restricción extra:

$$\boldsymbol{\gamma_i \geq 0} \quad (4)$$

El parámetro γi captura la asimetría de los shocks. La variable $I_{(t-1)}^-$ es igual a 1 cuando el shock es negativo y 0 en caso contrario. Por tanto, el modelo permite que los shocks negativos tengan un impacto adicional sobre la volatilidad en relación con los shocks positivos. En los modelos TV-GARCH, la varianza condicional se descompone de forma multiplicativa:

$$\boldsymbol{\sigma_t^2 = g_t h_t, \qquad g_t h_t > 0} \quad (5)$$

Aquí, $g_t$ es un proceso no estocástico, mientras que $h_t$ es un componente de tipo GARCH. El proceso $h_t$ se define como:

$$\boldsymbol{h_t = \omega + \alpha \phi_{(t-1)}^2 \beta h_{(t-1)}^2, where \;\; \phi_t^2 = e_t^2 / g_t} \quad (6)$$

Si $g_t$ es estacionario, el modelo se reduce a la especificación GARCH clásica [13].

El componente TV se basa en una función logística:

$$\boldsymbol{g_t = \delta_0 \delta_1 G\left(\gamma, c, \frac{t}{n}\right), \;\; 0 < \delta_0, \;\; -\delta_0 < \delta_1} \quad (7)$$

El parámetro $\delta_1$ representa el tamaño de la transición, indicando cuánto cambia la volatilidad en el punto de transición, mientras que $\delta_0$ denota la volatilidad de referencia antes de cualquier cambio. Si $\delta_1$=0, el modelo TV-GARCH se reduce al modelo GARCH clásico.

La función de transición logística viene dada por:

$$\boldsymbol{G(\gamma, c, t/n) = \frac{1}{1 + exp\{-\gamma(t/n - c)\}}} \quad (8)$$

C denota el punto medio de la transición, expresado como fracción de la muestra, y γ controla la velocidad de la transición, siendo valores mayores indicativos de un cambio más abrupto. El tamaño de la muestra se denota como n, y t es el índice temporal que va de 1 a n, de modo que t/n representa el tiempo escalado.

Antes de estimar un modelo TV-GARCH, [12] proponen un test para determinar el número de puntos de cambio. Siguiendo la explicación del [13] este test es un test de Multiplicador de Lagrange diseñado para detectar la presencia y el número de transiciones estructurales.

Es habitual en la literatura econométrica y financiera utilizar el logaritmo de los rendimientos [7]. Se definen de la siguiente manera:

$$R_t = \log\left(P_t / P_{t-1}\right) \quad (10)$$

## RESULTADOS

Los precios del mercado eléctrico presentan un comportamiento no estacionario, y los retornos logarítmicos son estacionarios. Se ha comprobado realizando el test KPSS.

La detección de puntos de cambio se resume en la Tabla 1. Si bien el test para tres rupturas muestra significación estadística, el modelo de una sola ruptura también resulta significativo. En consonancia con el principio de parsimonia y el consejo de los autores de centrarse en el p-valor más bajo, se elige una única ruptura como parámetro para el TV-GARCH y el TV-GJR-GARCH.

La ruptura identificada ocurrió en torno al 17 de octubre de 2023, señalando un cambio fundamental en las dinámicas de volatilidad del MIBEL. Esta fecha coincide con una cumbre de ministros de energía de la Unión Europea, durante la cual se alcanzaron importantes reformas estructurales para los mercados eléctricos. Alternativamente, este cambio puede reflejar el impacto retardado de las políticas fiscales y energéticas implementadas por los gobiernos español y portugués. Además, el aumento de la volatilidad podría atribuirse a un efecto acumulativo de riesgo derivado de las incertidumbres geopolíticas, o a un incremento de las energías renovables.

**Tabla 1.** Test para la detección de puntos de cambio

| Hipótesis | RobTR² | p-Valor |
|---|---|---|
| $H_0$: B3=B2=B1=0 | 9,1272 | 0,0276 |
| $H_{03}$: B3=0 | 0,0055 | 0,9410 |
| $H_{02}$: B2=0 \| B3=0 | 0,0918 | 0,7619 |
| $H_{01}$: B1=0 \| B3=B2=0 | 8,2814 | 0,0004 |

La tabla 2 presenta el desempeño comparativo de los modelos estimados basándose en el Criterio de Información Bayesiano (BIC) y las métricas de RMSE y MAE. El modelo TV-GJR-GARCH tiene el BIC más bajo (20,6670), lo que sugiere que proporciona el equilibrio más eficiente entre verosimilitud y complejidad del modelo. Sin embargo, este ajuste superior dentro de la muestra no se traduce de manera consistente en menores métricas de error; los modelos GJR-GARCH y GARCH estándar presentan valores más bajos de RMSE y MAE. Esta discrepancia sugiere que, aunque los componentes variables en el tiempo capturan la estructura subyacente de los datos de manera más efectiva los modelos estándar siguen siendo más robustos para minimizar las desviaciones absolutas.

Estos resultados son coherentes con los hallazgo presentados en [14], quienes argumentan que el modelo GARCH(1,1) estándar sigue siendo un punto de referencia robusto difícil de superar por especificaciones más complejas en términos de poder predictivo. No obstante, la adopción de modelos extendidos se justifica no únicamente por la precisión de las predicciones, sino por los conocimientos estructurales que proporcionan.

**Tabla 2.** BIC y métricas de error de los modelos estimados

| Modelo | BIC | RMSE | MAE |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| GJR-GARCH | 46,1770 | 0,3745 | 0,2144 |
| GARCH | 109,0730 | 0,3744 | 0,2151 |
| TV-GARCH | 88,4310 | 0,5321 | 0,2758 |
| TV-GJR-GARCH | 20,6670 | 0,5252 | 0,2567 |

En cuanto a la selección del modelo, los modelos GJR-GARCH y TV-GJR-GARCH muestran las puntuaciones BIC más bajas, como se observa en la Tabla 3, destacando la importancia del coeficiente asimétrico ($\gamma_1$). Esto indica un fuerte efecto apalancamiento en el mercado MIBEL, donde los shocks de precios negativos o los picos extremos tienen un mayor impacto en la incertidumbre futura que los cambios positivos o estables. Las dinámicas de volatilidad se caracterizan por un efecto ARCH relativamente modesto ($\alpha_1 \approx 0{,}04$ en modelos asimétricos), lo que sugiere que, aunque los shocks recientes son significativos, su impacto inmediato es limitado. Por el contrario, los elevados coeficientes GARCH ($\beta_1 \approx 0{,}60$) indican que la volatilidad del MIBEL es principalmente por sus propios valores históricos. La inclusión del componente Variable en el Tiempo (TV) está estadísticamente justificada por una transición rápida ($speed_1$=5,52) centrada al final de la muestra. Esta ruptura se alinea con el último trimestre de 2023, un período marcado por reformas regulatorias de la UE y tensiones geopolíticas. Al modelar explícitamente la varianza incondicional no estacionaria, el modelo TV-GJR-GARCH proporciona un marco más robusto y consistente para la evaluación del riesgo que los modelos GARCH estacionarios tradicionales, aunque los modelos GARCH ofrezcan un mejor desempeño en la predicción.

**Tabla 3.** Parámetros estimados de los modelos

| Parámetro | GJR-GARCH | GARCH | TV-GARCH | TV-GJR-GARCH |
|---|---|---|---|---|
| $\omega$ | 0,0059 | 0,0083 | 0,0711 | 0,0452 |
| $\alpha_1$ | 0,0409 | 0,4921 | 0,4994 | 0,0472 |
| $\beta_1$ | 0,6091 | 0,5069 | 0,5000 | 0,5997 |
| $\gamma$ | 0,6981 | — | — | 0,7719 |

## CONCLUSIONES

Este estudio examina las dinámicas de volatilidad no estacionaria del Mercado Ibérico de Electricidad (MIBEL) durante el período excepcionalmente turbulento de 2022-2023, caracterizado por shocks geopolíticos, intervenciones regulatorias y cambios rápidos en la mezcla energética. Los resultados proporcionan evidencia sólida de que los modelos econométricos estacionarios tradicionales son inadecuados para capturar el riesgo de mercado durante episodios de cambio estructural profundo.

El análisis empírico identifica un cambio significativo en el régimen de volatilidad centrado en octubre de 2023, marcando una transición hacia un nivel de incertidumbre persistentemente más alto. Este cambio estructural coincide con importantes reformas del mercado eléctrico europeo y podría reflejar el impacto acumulativo de las tensiones geopolíticas y las políticas energéticas domésticas. En particular, la caída de los precios spot a lo largo de 2023 condujo a un aumento de la volatilidad diaria de aproximadamente un 77% en comparación con 2022. La caída de los precios puede

explicarse por el clima inusualmente cálido, el aumento de la generación de energía renovable y una oferta energética estabilizada.

El modelo TV-GJR-GARCH supera a los modelos estacionarios en la captura de estas dinámicas al descomponer explícitamente la varianza en un componente determinista a largo plazo y un componente condicional a corto plazo. Aunque los modelos GARCH y GJR-GARCH estándar siguen siendo competitivos en términos de métricas de error de predicción, las especificaciones variables en el tiempo ofrecen una perspectiva estructural superior al acomodar la inestabilidad paramétrica y las transiciones de régimen. La significación estadística del término asimétrico confirma además la presencia de un pronunciado efecto apalancamiento en el mercado MIBEL, en el que los shocks de precios negativos provocan grandes aumentos en la volatilidad.

## REFERENCIAS


[1] Hidalgo-Pérez, Manuel; Collado, Natalia; Galindo, Jorge; Mateo, Ramón (2024). "The Iberian exception: Estimating the impact of a cap on gas prices for electricity generation on consumer prices and market dynamics". *Energy Policy*, v. 188, p. 114092. doi: 10.1016/J.ENPOL.2024.114092

[2] Robinson, David; Arcos-Vargas, Angel; Tennican, Michael; Núñez, Fernando (2023). "The Iberian Exception: An overview of its effects over its first 100 days". https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.02608

[3] Lamoureux, Christopher G.; Lastrapes, William D.; (1990). "Persistence in variance, structural change, and the GARCH model". *Journal of Business and Economic Statistics,* v. 8, n. 2, pp. 225-234. doi: 10.1080/07350015.1990.10509794

[4] Bollerslev, Tim (1986). "Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity". *Journal of Econometrics,* v. 31, n. 3, pp. 307-327. doi: 10.1016/0304-4076(86)90063-1

[5] Engle, Robert F. (1982). "Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation". *Econometrica,* v. 50, n. 4, p. 987, doi: 10.2307/1912773

[6] Bollerslev, Tim (2008). "Glossary to ARCH (GARCH)". *CREATES Research Papers*, p. 297. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1263250

[7] Cipra, Tomas (2020). "Time Series in Economics and Finance". *Time Series in Economics and Finance*, pp. 1-410, doi: 10.1007/978-3-030-46347-2

[8] Glosten, Lawrence R.; Jagannathan, Ravi; Runkle, David E. (1993). "On the Relation between the Expected Value and the Volatility of the Nominal Excess Return on Stocks". *The Journal of Finance,* v. 48, n. 5, p. 1779, doi: 10.2307/2329067

[9] Zakoian, Jean Michel (1994). "Threshold heteroskedastic models". *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 18, n. 5, pp. 931-955, doi: 10.1016/0165-1889(94)90039-6

[10] Nelson, Daniel B. (1991). "Conditional Heteroskedasticity in Asset Returns: A New Approach". *Econometrica,* v. 59, n. 2, p. 347, doi: 10.2307/2938260

[11] Amado, Cristina; Teräsvirta Timo (2013). "Modelling volatility by variance decomposition". *Journal of Econometrics,* v. 175, n. 2, pp. 142-153, doi: 10.1016/j.jeconom.2013.03.006

[12] Amado, Cristina; Teräsvirta, Timo (2017). "Specification and testing of multiplicative time-varying GARCH models with applications". *Econometric Reviews,* v. 36, n. 4, pp. 421-446, doi: 10.1080/07474938.2014.977064

[13] Campos-Martins, Susana; Genaro Sucarrat (2024). "Modeling Nonstationary Financial Volatility with the R Package tvgarch". *Journal of Statistical Software*, v. 108, n. 9, pp. 1-38, doi: 10.18637/jss.v108.i09

[14] Hansen, P. R.; Lunde A. (2005). "A forecast comparison of volatility models: Does anything beat a GARCH(1,1)?", *J. Appl. Econom.,* v. 20, n. 7, pp. 873-889, doi: 10.1002/jae.800

# LA PERSONALIDAD JURIDICA ALGORÍTMICA

**Gómez Morales, Manuel** [(1)]
*(1) Programa de doctorado en ciencias sociales y jurídicas, Universidad Miguel Hernández de Elche, manuel.gomez04@umh.umh.es*

## RESUMEN

La rápida expansión de la inteligencia artificial plantea un problema jurídico que excede la mera actualización tecnológica: la atribución de responsabilidad cuando un sistema algorítmico interviene de forma decisiva en daños individuales o colectivos. Este trabajo examina la evolución del marco europeo, desde el debate sobre la personalidad electrónica hasta el Reglamento (UE) 2024/1689 y las propuestas de simplificación digital, para valorar si la respuesta actual, basada en el riesgo y en la supervisión humana, resulta suficiente. A partir de posiciones doctrinales contrarias y favorables a la personalidad jurídica de la IA, así como de la analogía con la personificación del Mar Menor, se defiende una solución instrumental: no antropomorfizar al algoritmo, sino diseñar un estatuto limitado, registral y subordinado que mejore la trazabilidad, la reparación del daño y la seguridad jurídica. La automatización decisional y los sesgos de delegación refuerzan la necesidad de revisar el enfoque estrictamente antropocéntrico.

**Palabras clave:** inteligencia artificial; Reglamento IA; responsabilidad civil; personalidad jurídica; algoritmos; automatización; derechos fundamentales; registro digital.

## INTRODUCCIÓN

La Unión Europea ha pasado en menos de una década de plantear la eventual personalidad electrónica de los robots autónomos a consolidar un modelo regulatorio basado en el riesgo. El Informe Devaux abrió en 2017 un debate que fue pronto abandonado en favor de soluciones más preventivas: identificar prácticas prohibidas, clasificar sistemas de alto riesgo y exigir controles antes de su comercialización o uso. El Reglamento (UE) 2024/1689 confirma esa orientación ex ante y se integra con el Reglamento General de Protección de Datos y con el Reglamento de Datos, configurando el núcleo normativo europeo de la IA [1-3].

Sin embargo, la cuestión de fondo no ha desaparecido. La propuesta Ómnibus Digital y las presiones geopolíticas hacia la simplificación normativa reactivan la tensión entre innovación, mercado y protección de derechos. El problema principal no es si la IA debe ser tratada como un ser humano, sino si el sistema jurídico dispone de herramientas suficientemente claras para imputar daños, evitar la dispersión de responsabilidades y proteger a consumidores, usuarios y afectados por decisiones algorítmicas.

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta comunicación es valorar si el marco europeo actual basta para responder a los daños derivados de sistemas de IA complejos o si

resulta necesario construir una categoría jurídica específica, limitada y registral. De forma concreta, se pretende: a) sintetizar la tensión entre regulación de mercado y garantía de derechos fundamentales; b) confrontar los argumentos contrarios y favorables a la personalidad jurídica algorítmica; c) explorar la analogía con otras ficciones jurídicas reconocidas por el Derecho; y d) proponer criterios mínimos de trazabilidad, supervisión humana y responsabilidad subsidiaria.

## RESULTADOS

### Del Reglamento IA a la tensión entre derechos y mercado

El Reglamento IA aspira a armonizar el mercado europeo y, al mismo tiempo, proteger los valores de la Unión. Precisamente ahí aparece la primera tensión. Parte de la doctrina advierte que el texto puede funcionar más como instrumento de uniformidad económica que como garantía intensa de derechos fundamentales. Presno Linera subraya, entre otros puntos, las exclusiones vinculadas a seguridad nacional, defensa o fines militares, la confianza en evaluaciones internas de conformidad y la prolongada adaptación de determinados sistemas públicos ya existentes [4].

Frente a esa crítica, Finocchiaro interpreta que la estrategia europea responde al llamado efecto Bruselas: la UE no compite únicamente por producir tecnología, sino por fijar estándares globales de gobernanza, derechos y cultura jurídica [5]. Esta ambición regulatoria, no obstante, convive con un entorno internacional que presiona en sentido contrario. Las críticas estadounidenses al exceso de regulación de la IA evidencian que el debate ya no es solo técnico o jurídico, sino también geopolítico [6].

Esa tensión explica el cambio de clima regulatorio. La prevención del daño exige controles ex ante, auditorías y obligaciones de transparencia, pero la competición global empuja hacia reglas más simples y menos costosas. La pregunta, por tanto, no es únicamente cuánto regular, sino cómo evitar que la simplificación desplace a las víctimas hacia una zona de difícil reclamación cuando el daño se produce por sistemas opacos, entrenados con datos masivos y operados por cadenas empresariales fragmentadas.

### Personalidad jurídica: rechazo, ficción y trazabilidad

Las posiciones contrarias a reconocer personalidad jurídica a sistemas de IA descansan en una objeción central: el algoritmo no es un agente moral. Méndez Serrano rechaza la llamada falacia del homúnculo, esto es, la idea de que dentro del programa exista un sujeto autónomo que decide por sí mismo. Desde esta perspectiva, la IA seguiría siendo una cosa sofisticada, sin conciencia, intencionalidad ni comprensión semántica; por tanto, crear una persona electrónica podría facilitar que diseñadores, fabricantes u operadores eludan responsabilidad [7]. Pérez Escolar desarrolla una crítica similar desde la centralidad antropocéntrica del Derecho civil y alerta del riesgo moral de esconder a los verdaderos responsables tras una ficción jurídica [8].

La tesis favorable no exige, sin embargo, atribuir humanidad al algoritmo. López Segovia sostiene que la personalidad jurídica puede entenderse como una ficción técnica, análoga a la de sociedades, fundaciones u otros entes, diseñada para ordenar relaciones patrimoniales y procesales. A medida que aumenta la autonomía funcional, la responsabilidad puede diluirse entre programadores, fabricantes, operadores, propietarios y usuarios. Por ello propone un estatuto específico, siempre subordinado a

una persona natural o jurídica, acompañado de un registro público que permita identificar el sistema, su titularidad, su supervisión y la cadena de responsabilidades [9].

La utilidad de esta propuesta radica en separar personalidad de humanidad. Un algoritmo no necesitaría conciencia, dignidad ni derechos fundamentales propios para actuar como centro de imputación limitado. Bastaría con reconocerle una capacidad jurídica acotada: patrimonio afecto, seguro obligatorio, representante humano, historial de versiones, registro de usos y posibilidad de ser demandado o de comparecer procesalmente cuando su funcionamiento haya contribuido al daño. Así, la ficción jurídica serviría para ordenar la reparación, no para sustituir el reproche ético o jurídico a quienes diseñan y explotan el sistema.

La analogía con la personalidad jurídica del Mar Menor resulta útil porque muestra que el Derecho puede crear sujetos no humanos cuando persigue finalidades dignas de tutela. La STC 142/2024 admite una interpretación evolutiva del ordenamiento y abre la puerta a formas de personalidad funcional. Serrano de Nicolás destaca que la atribución de personalidad es un instrumento técnico orientado a finalidades concretas [10]. Plaza Martín, por su parte, recuerda que reconocer derechos no garantiza su eficacia si faltan reglas precisas, voluntad de aplicación y mecanismos de cumplimiento [11]. Trasladado a la IA, la conclusión es clara: una personalidad algorítmica solo tendría sentido si mejora la identificación, reparación y control, no si opera como pantalla de irresponsabilidad.

La advertencia de la denominada falacia de la ineficacia es especialmente valiosa. Crear un nuevo sujeto jurídico no resolvería por sí solo la opacidad técnica, la desigualdad probatoria ni la falta de recursos de los perjudicados. Por eso el estatuto debería definir con precisión qué sistemas quedan incluidos, qué obligaciones de documentación soportan, qué autoridad supervisa el registro, qué patrimonio o garantía cubre los daños y en qué casos responden solidariamente proveedores, desplegadores y usuarios profesionales.

**Automatización decisional y límites de la supervisión humana**

La suficiencia del enfoque antropocéntrico también se debilita cuando se observa la realidad decisional. Los sistemas de IA se tratan jurídicamente como instrumentos, pero en la práctica pueden influir de manera determinante en decisiones humanas. El caso Adam Raine, citado como ejemplo extremo de daño asociado a interacción conversacional, muestra la dificultad de distinguir entre uso indebido, diseño defectuoso, fallos de salvaguarda y responsabilidad empresarial [12].

Además, la supervisión humana no siempre neutraliza el riesgo. Skitka, Mosier y Burdick explican el sesgo de automatización: las personas tienden a confiar en la recomendación automática incluso cuando existen señales alternativas más fiables. Ese sesgo genera errores de omisión, cuando no se actúa por falta de alerta automatizada, y errores de comisión, cuando se sigue una recomendación incorrecta. A ello se suma el sesgo de menor esfuerzo cognitivo y la difusión de responsabilidad: la máquina funciona como muleta decisional y como vía psicológica para desplazar la culpa [13].

Por ello, limitarse a afirmar que siempre decide una persona puede ser jurídicamente cómodo, pero materialmente insuficiente. En sectores de especial impacto —sanidad, justicia, crédito, educación, empleo o seguridad— la decisión humana puede quedar condicionada por una arquitectura algorítmica opaca. La cuestión relevante no es si el algoritmo “piensa” como una persona, sino si su intervención produce efectos jurídicos y sociales tan intensos que exige una trazabilidad propia.

La metáfora del marinero y el faro permite visualizar el problema: una señal que tradicionalmente guía puede convertirse en trampa si se confunde con otra luz y nadie contrasta la carta náutica. El algoritmo funciona de modo parecido cuando aporta una respuesta aparentemente objetiva. Si el profesional cansado, presionado o temeroso de asumir culpa descansa en esa respuesta sin verificarla, la supervisión humana se vuelve formal. La regulación debe atender a esa realidad, porque la delegación psicológica de la decisión puede ser tan relevante como la delegación jurídica.

**Propuesta de encaje normativo**

Una solución equilibrada exigiría tres cautelas. La primera es registral: solo deberían acceder a esta categoría los sistemas de IA de especial autonomía funcional o impacto social, con identificación pública del proveedor, desplegador, finalidad, versiones relevantes, auditorías y responsable de supervisión. La segunda es patrimonial: la personalidad funcional debería ir acompañada de seguros, fondos o garantías suficientes para reparar daños sin obligar al afectado a reconstruir toda la cadena técnica.

La tercera cautela es procesal y evita la impunidad. El sistema podría ser demandado a través de un representante, pero esa comparecencia no extinguiría la responsabilidad humana. Al contrario, debería activar un régimen de responsabilidad subsidiaria o solidaria cuando el daño proceda de defectos de diseño, entrenamiento, actualización, comercialización, despliegue o supervisión. En el ámbito judicial, administrativo o sanitario, esta fórmula permitiría dirigir la acción frente al centro de imputación algorítmico y, simultáneamente, frente a quienes decidieron utilizarlo o mantenerlo.

**Especial referencia al uso judicial y administrativo**

El ejemplo de los sistemas de apoyo a la decisión judicial permite apreciar con nitidez por qué la personalidad funcional no debe concebirse como un privilegio de la máquina, sino como una herramienta de garantía. Si un órgano judicial, administrativo o sanitario utiliza un sistema algorítmico que propone una decisión, prioriza expedientes, calcula riesgos o condiciona la valoración de una persona, el afectado necesita saber qué sistema intervino, con qué versión, qué datos fueron empleados, quién autorizó su despliegue y qué margen real tuvo el decisor humano para apartarse de la recomendación.

En estos casos, la ficción registral permitiría articular una acción más clara. El sistema de IA podría figurar como centro de imputación patrimonial, representado por su titular o responsable de despliegue, y la reclamación podría dirigirse también contra las personas físicas o jurídicas que lo diseñaron, validaron, comercializaron o utilizaron. Esta construcción evitaría dos resultados igualmente indeseables: que todo se impute de forma automática al usuario final que pulsó el botón, o que la cadena técnica quede tan fragmentada que la víctima no pueda reconstruirla.

La posibilidad de demandar al sistema registrado no significa que el algoritmo sea culpable en sentido moral. Significa que el Derecho crea un punto de entrada procesal y patrimonial para ordenar la controversia. La responsabilidad última debería mantenerse en los humanos y organizaciones que controlan el ciclo de vida de la IA, pero la personalidad funcional facilitaría prueba, legitimación pasiva, medidas cautelares, actualización de auditorías y ejecución de garantías económicas. En un fallo judicial asistido por IA, por ejemplo, esta vía permitiría examinar si el error procede del diseño del modelo, de datos sesgados, de una actualización defectuosa, de una integración inadecuada o de una supervisión meramente formal.

También sería necesario introducir límites expresos. No todo software ni toda aplicación de IA debería acceder a esta categoría. El estatuto se reservaría a sistemas con alto impacto decisional, autonomía funcional relevante o capacidad de afectar derechos fundamentales. Además, la inscripción registral tendría que ser dinámica: cada versión significativa, cambio de finalidad, modificación de datos de entrenamiento, auditoría o incidencia grave debería quedar documentada. Solo así la trazabilidad dejaría de ser una declaración de principios y se convertiría en una garantía útil para los afectados.

La clave del modelo se encuentra en su carácter acumulativo. El registro no sustituye las obligaciones del Reglamento IA, del RGPD o de la normativa de responsabilidad civil; las conecta. La documentación técnica, la evaluación de riesgos, la información a usuarios y la supervisión humana deberían proyectarse también sobre la fase de reclamación, de modo que el perjudicado no dependa únicamente de peritajes costosos para descubrir qué ocurrió.

Por ello, la personalidad funcional debe entenderse como una institución de seguridad jurídica. Su valor no reside en conceder derechos humanos a la IA, sino en hacer visible una infraestructura decisional que hoy puede quedar dispersa entre contratos, proveedores, modelos, bases de datos y actualizaciones. Cuanto mayor sea la autonomía práctica del sistema, mayor debería ser la exigencia de identificación, garantía económica y control externo.

## CONCLUSIONES

Primera. El Reglamento IA representa un avance relevante, pero no clausura el debate sobre responsabilidad. Su enfoque preventivo debe complementarse con mecanismos posteriores de identificación, reparación y control cuando el daño ya se ha producido.

Segunda. La personalidad jurídica de la IA no debe formularse como humanización del algoritmo. La vía técnicamente más prudente es una personalidad funcional, limitada, registral y subordinada, pensada para ordenar responsabilidades y no para liberar a desarrolladores, proveedores u operadores.

Tercera. Un registro público de sistemas algorítmicos avanzados permitiría conocer quién diseña, entrena, explota, actualiza y supervisa cada sistema. Esa trazabilidad sería especialmente útil cuando intervienen múltiples actores y la víctima desconoce contra quién dirigir su reclamación.

Cuarta. En supuestos de fallos decisionales graves —por ejemplo, sistemas de apoyo a decisiones judiciales, administrativas o sanitarias— la personalidad registrada permitiría articular acciones procesales frente al sistema mediante representante, sin excluir la responsabilidad subsidiaria o solidaria de las personas físicas o jurídicas que lo controlan. De este modo, la IA podría ser demandada o intervenir procesalmente como centro de imputación patrimonial, pero nunca como excusa para vaciar de responsabilidad a los humanos.

Quinta. La regulación estrictamente antropocéntrica resulta cada vez menos convincente cuando la decisión humana se apoya en sistemas opacos y persuasivos. El reto no consiste en reconocer conciencia a las máquinas, sino en evitar que la complejidad técnica se convierta en un espacio de impunidad.

Sexta. La futura discusión normativa debería centrarse menos en si la IA se parece al ser humano y más en qué garantías necesita la ciudadanía cuando una decisión automatizada incide de forma real en su vida, su patrimonio, su salud, su trabajo o su tutela judicial efectiva.

## REFERENCIAS

[1] Parlamento Europeo y Consejo (2024). Reglamento (UE) 2024/1689, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial.

[2] Comisión Europea (2025). Proposal for a Regulation amending Regulations (EU) 2016/679, 2018/1724, 2018/1725, 2023/2854 and related Directives as regards simplification of the digital legislative framework, COM(2025) 837 final.

[3] Parlamento Europeo y Consejo (2016). Reglamento (UE) 2016/679, Reglamento General de Protección de Datos.

[4] Presno Linera, M. A. (2025). "El Reglamento europeo de inteligencia artificial: ¿garantía del mercado o defensa de los derechos?" Revista Española de Derecho Constitucional, 135, 13-49. https://doi.org/10.18042/cepc/redc.135.01

[5] Finocchiaro, G. (2024). "La regulación de la inteligencia artificial". AI & Society, 39, 1961-1968. https://doi.org/10.1007/s00146-023-01650-z

[6] Madhani, A. y Adamson, T. (2025). "JD Vance arremete contra el exceso de regulación de la IA en crítica a la estrategia europea". AP News, 11 de febrero de 2025.

[7] Méndez Serrano, M. M. (2024). "Derechos fundamentales y personalidad jurídica de los robots: ¿para qué?" Derecho Privado y Constitución, 44, 51-89. https://doi.org/10.18042/cepc/dpc.44.02

[8] Pérez Escolar, M. (2025). "Personalidad jurídica e inteligencia artificial: fundamentos de atribución imposibles". InDret, 3, 39-66.

[9] López Segovia, C. (2024). "Personalidad jurídica de las inteligencias artificiales". Isidorianum, 33(2), 353-393. https://doi.org/10.46543/ISID.2433.1062

[10] Serrano de Nicolás, A. (2025). "Personalidad jurídica de la laguna del Mar Menor y derechos conexos". Derecho Privado y Constitución, 47, 133-166. https://doi.org/10.18042/cepc/dpc.47.04

[11] Plaza Martín, C. (2025). "La Hidra de Lerna en el Mar Menor". Revista Española de Derecho Constitucional, 135, 285-319. https://doi.org/10.18042/cepc/redc.135.09

[12] Yousif, N. (2025). "Los padres de un adolescente que se quitó la vida demandan a OpenAI, creadora de ChatGPT". BBC News Mundo, 27 de agosto de 2025.

[13] Skitka, L. J.; Mosier, K. L.; Burdick, M. (1999). "Does automation bias decision-making?" International Journal of Human-Computer Studies, 51, 991-1006. https://doi.org/10.1006/ijhc.1999.0252.

# Realidad Aumentada e Inteligencia Artificial Multimodal para la Educación Asistida e Interactiva en la Infancia

**Linares-Carrasquer, Jordi[(1)], Aliaga-Torro, Carlos [(2)], Taverner, Joaquín[(3)], Izquierdo-Domenech, Juan[(4)]**

*(1) Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, España. jlincar@epsa.upv.es*

*(2) Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, España. calitor@upv.es*

*(3) Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, España. joataap@upv.es*

*(4) Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, España. juaizdom@upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y prototipado de un asistente educativo de dibujo para la infancia basado en realidad aumentada e inteligencia artificial multimodal. La propuesta se concibe de forma general para gafas de realidad aumentada con cámara, micrófono, salida visual y reproducción de audio. Para este caso, se ha implementado la arquitectura sobre las gafas RayNeo X2. El sistema permite que el infante interactúe mediante voz, solicite qué quiere dibujar o pida ayuda sobre un esbozo iniciado, y reciba una guía visual y auditiva mientras trabaja sobre una pizarra o un papel. El prototipo integra Unity y OpenXR con APIs de OpenAI para transcripción automática, análisis multimodal y generación de imágenes, y con la API de ElevenLabs para síntesis de voz multilingüe. La experiencia se orienta al aprendizaje por andamiaje: el asistente interpreta la intención, genera una referencia infantil sencilla y ofrece indicaciones progresivas. Los resultados muestran la viabilidad de usar gafas AR como interfaz natural para tutoría educativa multimodal, aunque se requieren evaluaciones con usuarios, mejoras de privacidad y adaptación pedagógica por edades.

**Palabras clave**: realidad aumentada; inteligencia artificial multimodal; educación infantil; dibujo asistido; gafas AR; Unity; visión artificial; speech-to-text; text-to-speech; aprendizaje interactivo.

## INTRODUCCIÓN

La realidad aumentada permite añadir información digital al entorno físico sin sustituir por completo la actividad real [1,2]. Esta característica resulta especialmente útil en educación infantil, donde el aprendizaje suele apoyarse en objetos tangibles,

movimiento, observación y experimentación. En una tarea como dibujar, el soporte físico (ya sea pizarra, hoja o cuaderno) no es un elemento secundario: ayuda al niño a practicar coordinación, control del trazo, atención visual, memoria de formas y planificación. Frente a herramientas que trasladan todo el proceso a una pantalla, la propuesta de este trabajo mantiene la acción principal en el mundo real y utiliza la capa aumentada como apoyo contextual.

El proyecto plantea un asistente educativo que funciona como tutor de dibujo. El niño puede decir, por ejemplo, “quiero dibujar una casa”, “no sé qué dibujar” o “ayúdame con este dibujo”. A partir de esa petición, el sistema captura lo que el usuario está viendo, transcribe la voz, interpreta conjuntamente la imagen y el texto, genera una referencia visual adaptada a un estilo infantil y responde con una explicación hablada. El uso de los recientes avances multimodales de los modelos de inteligencia artificial, permiten dotar de asistencia, guía y complemento creativo a los niños usuarios; un enfoque que permite combinar la mejor creatividad humana con la inteligencia artificial generativa en perfecta sintonía.

Aunque el prototipo se ha implementado sobre gafas RayNeo X2, el enfoque no depende conceptualmente de un único fabricante. La arquitectura se dirige a cualquier gafa de realidad aumentada de características equivalentes: cámara para visión en primera persona, micrófono para entrada oral, salida visual para mostrar referencias o indicaciones, altavoz o auricular para respuesta hablada y un entorno de desarrollo compatible con Unity, OpenXR o APIs similares. Las gafas RayNeo X2 se usan en este trabajo como plataforma de experimentación porque permite acceder a cámara compartida y a capacidades AR mediante su SDK, pero el diseño se ha preparado y organizado como una solución portable.

El interés de la propuesta reside en la combinación coordinada de varias modalidades: voz de entrada, visión desde primera persona, razonamiento multimodal, generación visual, interfaz aumentada y voz de salida, en línea con los principios del aprendizaje multimedia [3]. Esta integración aproxima la aplicación a un tutor situado, capaz de comprender qué ve el usuario y qué quiere hacer. En infancia, esta capacidad debe acompañarse de un tono amable, instrucciones cortas y feedback positivo. El asistente no pretende sustituir al docente ni al acompañamiento familiar, sino ofrecer una capa de apoyo individualizado para actividades creativas y manipulativas.

## OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo ha sido desarrollar un prototipo de asistente educativo multimodal en realidad aumentada que ayude a niños a dibujar mediante una interacción natural basada en voz, visión e imágenes generadas por IA. El sistema se plantea como una arquitectura general para gafas AR, validada en una implementación concreta sobre RayNeo X2, con la finalidad de demostrar que la tutoría puede integrarse sobre el soporte físico de aprendizaje sin desplazar al niño a una pantalla convencional.

Los objetivos específicos son: permitir la captura de imagen desde la perspectiva del usuario; incorporar interacción oral mediante grabación de audio y transcripción automática; analizar la petición del niño junto con la imagen capturada para producir instrucciones contextualizadas; generar una referencia visual clara, sencilla y adecuada

al nivel infantil; sintetizar la respuesta del asistente en voz para reducir la dependencia de lectura; y mostrar una comparación visual entre el dibujo del usuario y la referencia generada. Además, se busca que el asistente sea multilingüe y pueda responder en un tono cercano, seguro y motivador.

Desde el punto de vista pedagógico, la propuesta se inspira en el aprendizaje por andamiaje [4]. En lugar de entregar una solución completa y exigir que el niño la copie, el sistema propone pasos parciales: empezar por formas básicas, comparar proporciones, añadir detalles gradualmente y reforzar el progreso. Para una tarea como dibujar una casa, la referencia debe ser deliberadamente simple: un tejado triangular, puerta, ventanas, chimenea, flores y algunos adornos. Una imagen excesivamente compleja podría frustrar al niño; una referencia clara y alcanzable, en cambio, facilita que el usuario avance y mantenga la motivación.

## METODOLOGÍA

### Diseño general independiente del dispositivo

La arquitectura se organiza en capas para separar el caso de uso educativo de la plataforma concreta. La primera capa corresponde al dispositivo AR, encargado de proporcionar cámara, micrófono, visualización y reproducción de audio. La segunda capa corresponde a Unity, que gestiona la escena, los elementos de interfaz, las corrutinas, las peticiones HTTP y la reproducción de recursos, con apoyo de XR Plug-in Management y OpenXR [5,6]. La tercera capa integra los servicios de IA: transcripción, análisis multimodal, generación de una consigna visual, generación de imagen y síntesis de voz. Esta separación permite que, en una futura adaptación a otras gafas AR, solo sea necesario reemplazar el módulo de acceso a cámara o las APIs específicas del fabricante, manteniendo el flujo educativo y la lógica multimodal.

En la implementación actual se utilizan RayNeo X2 y el paquete RayNeo OpenXR ARDK como ejemplo de dispositivo AR. El proyecto de Unity emplea OpenXR y permisos Android de cámara y micrófono. El script principal, AudioRecorderUI, coordina la grabación, la captura de imagen, la comunicación con las APIs y la actualización de la interfaz. También existe un script PhotoCapture para pruebas de captura periódica de la escena. Esta organización evidencia que RayNeo X2 actúa como plataforma de validación: aporta acceso práctico a la cámara y al entorno AR, pero el concepto del tutor se puede trasladar a otros dispositivos con prestaciones equivalentes.

### Flujo de interacción

El flujo de uso puede resumirse en seis fases. Primero, el usuario activa la grabación desde la interfaz. Segundo, el sistema captura una imagen de la escena desde la cámara de las gafas. Tercero, el niño formula oralmente su intención, como pedir una idea de dibujo o solicitar ayuda sobre un esbozo ya iniciado. Cuarto, al detener la grabación, el audio se guarda en formato WAV y se envía a un modelo de transcripción. Quinto, la transcripción y la imagen codificada se envían a un modelo multimodal que genera una respuesta breve, contextual y adaptada al usuario infantil. Sexto, el texto

resultante se transforma en voz y se usa también para construir una imagen de referencia que se muestra en la interfaz.




Figura 1. Escenario conceptual del tutor de dibujo: esbozo inicial y esbozo avanzado frente a una referencia infantil generada por IA.

## Componentes de inteligencia artificial

El sistema combina cuatro capacidades de IA implementadas mediante APIs externas. La primera es la transcripción automática de voz, realizada con la API de audio de OpenAI para transcribir la voz del niño antes de procesar la petición [7]. La segunda es la visión y el razonamiento multimodal, donde la imagen capturada desde la cámara de las gafas y la transcripción se envían a la Responses API de OpenAI como entrada combinada de texto e imagen [8]. La tercera es la generación de imágenes, usada para crear una referencia visual infantil mediante la Images API de OpenAI [9]. La cuarta es la síntesis de voz, que convierte la respuesta del tutor en audio mediante la API de ElevenLabs, de modo que el niño pueda seguir dibujando sin depender de lectura continua en pantalla [10].

La elección de OpenAI y ElevenLabs responde a la necesidad de cubrir el ciclo multimodal completo con servicios ya disponibles: OpenAI aporta transcripción, comprensión visual, generación textual y generación de imagen; ElevenLabs aporta una

voz sintética natural, configurable y multilingüe. Esta separación también mantiene la arquitectura modular: en futuras versiones podrían sustituirse modelos o proveedores sin cambiar la lógica pedagógica principal. El carácter multilingüe es especialmente relevante en contextos infantiles y educativos, porque un niño puede expresarse en su lengua materna, mezclar idiomas o usar frases muy simples.

### Interfaz y diseño para infancia

La interfaz conceptual se compone de un único botón mediante el cual el usuario puede iniciar la grabación de lo que está viendo y de su micrófono. Más tarde, cuando se termina de procesar la petición, la aplicación devuelve una imagen de referencia en la pantalla. Para un público infantil, el diseño de la imagen evita la saturación visual y usa formas simples, colores suaves, iconos reconocibles y mensajes breves. En el caso de ejemplo, la referencia es una casa con puerta azul, tejado rojo, ventana redonda, chimenea, flores y pequeños adornos.

El feedback textual se reduce al mínimo y se prioriza la guía hablada. En lugar de presentar evaluaciones complejas, el asistente puede decir frases cortas como “muy bien, ahora dibuja la ventana redonda” o “prueba a añadir flores cerca de la puerta”. Este tipo de respuesta favorece la continuidad de la actividad y evita que el niño perciba la aplicación como un sistema de corrección rígido. La prioridad no es calificar el dibujo, sino acompañar el proceso creativo.

## RESULTADOS

El resultado principal es una prueba de concepto funcional que integra captura de cámara, grabación de audio, transcripción con OpenAI, procesamiento multimodal mediante OpenAI Responses, generación de referencia visual con OpenAI Images y síntesis de voz con ElevenLabs dentro de un proyecto Unity. La implementación se ha realizado sobre RayNeo X2 por disponibilidad de SDK y acceso a cámara compartida, pero el resultado se interpreta como una validación de arquitectura para gafas AR en general. El flujo no depende de una característica pedagógica exclusiva de RayNeo, sino de capacidades comunes en dispositivos AR modernos: visión, audio, visualización aumentada y conectividad.

La escena principal enlaza un botón de grabación, textos de estado, un campo de resultado, un AudioSource y un RawImage para la imagen generada. El sistema permite iniciar la grabación, capturar la escena, transcribir la petición, analizar texto e imagen, reproducir una respuesta hablada y mostrar una referencia visual. El script de captura periódica añade una base para pruebas de percepción continua, aunque la aplicación principal funciona por turnos de interacción. Esta estrategia por turnos es adecuada para un prototipo educativo porque hace que el flujo sea más controlable y reduce llamadas innecesarias a servicios externos.

Desde la perspectiva de diseño, las imágenes conceptuales muestran con claridad el objetivo educativo: una referencia sencilla en el lado derecho y el progreso del usuario en el lado izquierdo. La comparación entre esbozo inicial y esbozo avanzado representa

el acompañamiento paso a paso que se espera del tutor. En lugar de una referencia demasiado realista, se utiliza una ilustración infantil con elementos básicos. Esta decisión mejora la coherencia con la edad objetivo y refuerza el valor del resultado como herramienta educativa, no solo como demostración tecnológica.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una propuesta de tutor de dibujo en realidad aumentada que combina interacción oral, visión en primera persona, razonamiento multimodal, generación de imágenes y síntesis de voz. La contribución principal es mostrar cómo estas capacidades pueden integrarse en una experiencia educativa situada: el niño mantiene la actividad en una pizarra o papel físico, mientras la capa AR proporciona referencia visual y guía auditiva. La implementación sobre RayNeo X2 demuestra la viabilidad práctica del enfoque, pero la propuesta se formula para gafas AR de características equivalentes y no como una solución cerrada a un único dispositivo.

Como trabajo futuro, la aplicación puede evolucionar hacia un asistente educativo más general. Además del dibujo, podría ayudar en escritura, lectura, explicación de esquemas en pizarra, aprendizaje de vocabulario, resolución de problemas sencillos o actividades creativas guiadas. En el plano técnico, se propone añadir seguimiento temporal del dibujo, comparación automática entre esbozo y referencia, niveles de dificultad adaptativos, perfiles por edad, ejecución parcial en local para reducir latencia y un backend para proteger datos. En conjunto, la convergencia entre gafas de realidad aumentada e IA multimodal abre una vía prometedora para crear experiencias educativas más naturales, interactivas y personalizadas.

## REFERENCIAS

[1] Milgram, Paul; Kishino, Fumio (1994). “A taxonomy of mixed reality visual displays”. IEICE Transactions on Information and Systems, v. E77-D, n. 12, pp. 1321-1329. https://globals.ieice.org/en_transactions/information/10.1587/e77-d_12_1321/_p
[2] Azuma, Ronald T. (1997). “A survey of augmented reality”. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, v. 6, n. 4, pp. 355-385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355
[3] Mayer, Richard E. (2009). Multimedia Learning. 2.ª ed. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 9780521735353
[4] Vygotsky, Lev S. (1978). Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes. Ed. Michael Cole, Vera John-Steiner, Sylvia Scribner y Ellen Souberman. Cambridge, MA: Harvard University Press. ISBN: 9780674576292
[5] Unity Technologies. Unity Manual: XR Plug-in Management. https://docs.unity3d.com/Manual/com.unity.xr.management.html
[6] Khronos Group. OpenXR Overview. https://www.khronos.org/openxr/
[7] OpenAI. Speech to text. https://developers.openai.com/api/docs/guides/speech-to-text
[8] OpenAI. Responses API Overview. https://developers.openai.com/api/reference/responses/overview
[9] OpenAI. Image generation. https://developers.openai.com/api/docs/guides/image-generation
[10] ElevenLabs. Create speech. https://elevenlabs.io/docs/api-reference/text-to-speech/convert

# IA y conducción de vehículos: más cerca de lo que pensamos

**Rivero Jordá, Julio Esteban[(1)], Peydró Rasero, Miguel Ángel [(2)], García Carrasco, Sergio[(2)], Cerdá Leal, Francisco de Paula[(1)]**

*(1) Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España*
*(2) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España,*

## RESUMEN

En los últimos años se ha visto un proceso de automatización en la conducción, desde las propias ayudas a la conducción hasta intentos de implementar la IA dentro de los vehículos controlando todos los sistemas de este. Dentro de este punto se pueden encontrar procesos conocidos como deep learning, en el que se entrena a la IA a partir de miles de datos y simulaciones para poder controlar hasta el más mínimo detalle. Parte de estos simuladores son videojuegos, en los que se entrena a la IA a partir de los inputs de los jugadores y que ayuda a esta a predecir el comportamiento del coche en situaciones extremas.

**Palabras clave:** vehículo autónomo, deep learning, entrenamiento de IA, videojuegos.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se piensa en conducción autónoma, a muchos les viene a la mente Kitt, un Pontiac Firebird Trans-Am que apareció en la serie El coche fantástico, y que se caracterizaba por ser capaz de conducir solo hacia donde el personaje principal le decía, e incluso podía establecer una conversación con los personajes de la serie. En la época en la que se produjo la serie, se veía lejos el día en que apareciese uno así, pero hoy en día se encuentran ya prototipos que ya incluyen este tipo de tecnologías.

Los vehículos autónomos, según la DGT, son vehículos que pueden desplazarse sin que haya la supervisión de un conductor [1]. Estos están diseñados para que, a partir de una serie de sensores y sistemas automatizados, pueda moverse respetando la normas de conducción. No obstante, hay diversos niveles de automatización, divididos según la Sociedad de Ingenieros del Automóvil (SAE por sus siglas en inglés) como se ve en la Figura 1.

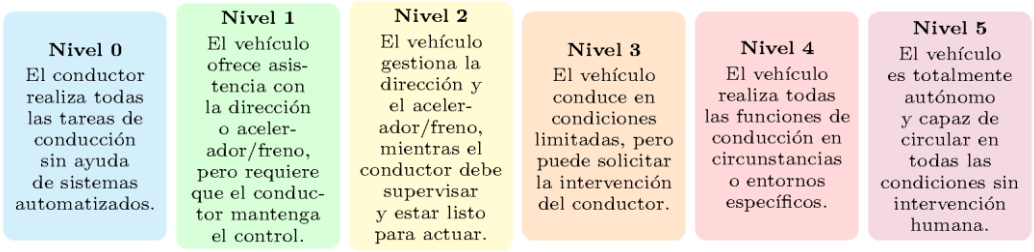



**Figura 1.** Niveles de automatización de la conducción según la SAE. Traducido y adaptado de [2]

La mayoría de los coches fabricados en la unión europea en la actualidad tienen niveles de automatización 0 o 1, con ayudas como el control de crucero, la asistencia de cambio de carril o la frenada de emergencia. En España. la DGT permite solo automatización hasta el nivel 3 [1], aunque ya se han visto en otros sitios coches completamente autónomos, de nivel 5, como por ejemplo los Teslas autónomos que estuvieron en pruebas en Silicon Valley hace unos años y que ahora circulan en Texas.

## OBJETIVOS

Los objetivos que se plantean en este artículos son los siguientes:

- Conocer cómo funcionan los coches autónomos.
- Qué modelos de IA son los que se están implementando.
- Como se está entrenando a la IA en diferentes situaciones.
- Como se está aplicando en la industria.

## FUNCIONAMIENTO DEL COCHE AUTÓNOMO

Para poder entender cómo funciona un coche autónomo, se debe entender que componentes incluye un coche moderno. Un vehículo fabricado en los últimos 20 años contiene microordenadores, que controlan una serie de sensores, interpretan la información que recibe y actúan sobre el sistema que controla para llegar a unos parámetros definidos, como se muestra en la Figura 2. La mayoría de estos parámetros vienen predefinidos por el fabricante (parámetros del motor) y por el conductor (control crucero), sin embargo, ya hay controladores que vienen con IA y que actúa sobre la conducción, como el famoso sensor que te dice si estás cansado y necesitas parar.

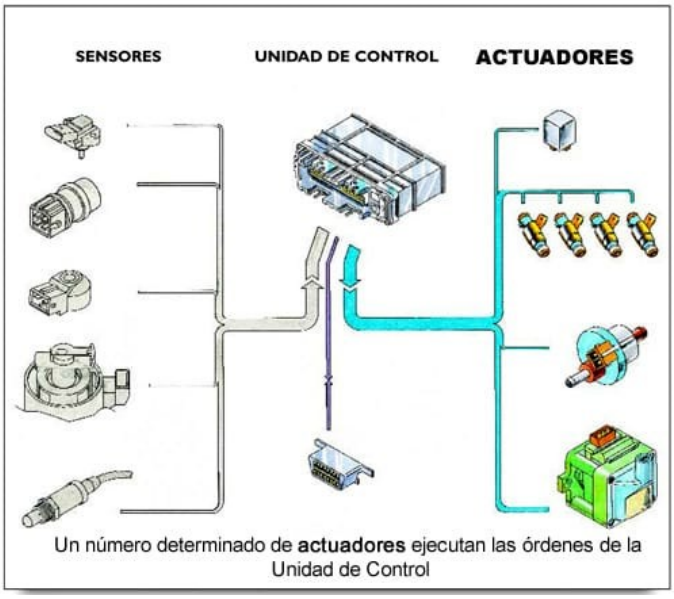



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento de los actuadores de un vehículo

El coche autónomo controla todos estos microordenadores y la función de conducción, de tal forma que le dices al coche a dónde quieres ir, y este transporta a la persona al destino indicado, siguiendo las instrucciones y las normas de circulación indicadas. No obstante, una de las problemáticas que tiene esta tecnología es que hay tantas variables y sucesos posibles a cada segundo, que la capacidad de interpretar y reaccionar a ciertos sucesos es imprevisible y, en ciertas ocasiones, errónea. Es por ello por lo que en últimos años se está optando por entrenar a la IA antes de que sea implementada en los vehículos.

## ENTRENAMIENTO DE LA IA

En la industria se han explorado diversos métodos de entrenar a la IA en busca de implementarla en los vehículos, trabajando en la toma de decisiones a partir de lo que recibe de los sensores. No obstante, tres métodos son los más usados a la hora de buscar este objetivo, las cuales se van a explicar a continuación.

### Decisiones basadas en la lógica

Se aplica un modelo de interferencia en la que la IA aplica reglas de lógica para tomar las decisiones correspondientes en la conducción. Estas se apoyan en lo que observa la IA por los sensores, lo procesa y manda a los microordenadores correspondientes como tiene que actuar cada sistema.

Dentro de lo que es la conducción, este método puede ayudar en acciones sencillas, como es un giro o un cambio de carril en espacios controlados. Sin embargo, tiene dos desventajas fundamentales por las cuales este modelo está siendo utilizado cada vez menos. El primero es la cantidad leyes que hay que dar a la IA, que hace que el tiempo de procesado sea largo y por tanto, el tiempo de reacción que tendría es mucho menor. El segundo problema es una consecuencia del primero, y es que en situaciones impredecibles el modelo no llega a ser del todo efectivo, si bien hay algunos algoritmos que se han desarrollado que permiten tomar este tipo de decisiones.

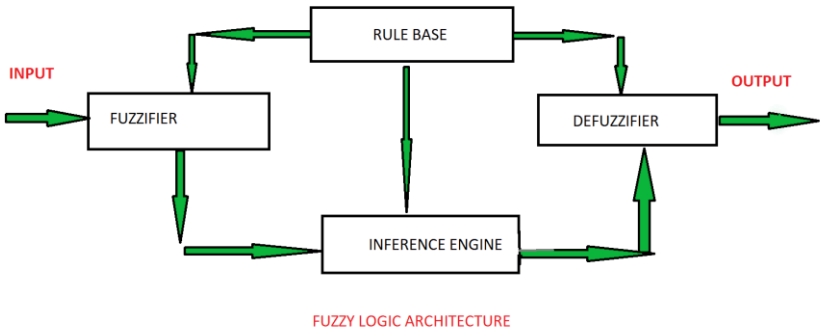



**Figura 3.** Esquema de decisiones basadas en lógica

### Decisiones heurísticas

Varios modelos de toma de decisiones se basan en decisiones heurísticas. Estas se pueden definir como las tomadas a partir de la intuición o la experiencia que permite emplear los mínimos recursos (en términos informáticos) posibles. Esto permite obtener

decisiones más rápidas que el modelo anterior al optimizar el uso de los recursos de la IA y no tener tantas leyes que procesar. No obstante, el problema principal es que a veces no se llega a converger en una solución.

Los últimos modelos que se están sacando en este sentido son modelos metaheurísticos, que intentan simular la estructura y el funcionamiento del cerebro humano. Sin embargo, no se usan debido a que las decisiones que toma no son tan intuitivas como lo podría ser en un principio y que le falta interpretación en algunas situaciones. Las mejoras que se tendrían que hacer se relacionan con un entrenamiento más completo de la IA en estos casos.

**Deep reinforcement learning**

El deep reinforcement learning es un modelo que empieza a establecerse en la industria del automóvil sobre el 2020 gracias a que aporta mejores datos y es más eficaz. En estos modelos, la IA se enfrenta a unas simulaciones en el que se la entrena en diferentes situaciones, y se tiene un sistema de recompensas, en el que si la IA hace una acción de manera correcta, recibe esas recompensas y le anima a seguir haciendo esa misma acción en esa situación. Existen dos tipos principales de deep reinforcement learning: con un modelo explícito de las situaciones que se quieran entrenar y modelos en los que no se tiene una situación concreta, sino que hay posibilidades de que puedan pasar diferentes cosas.

Este modelo permite el uso de agentes múltiples, es decir, que la IA puede controlar diversos sistemas a la vez. Esto viene bien para poder controlar diversos sistemas y movimientos a la vez, o incluso para poder realizar diversas pruebas a la vez, dando un entrenamiento a la IA muy alta.

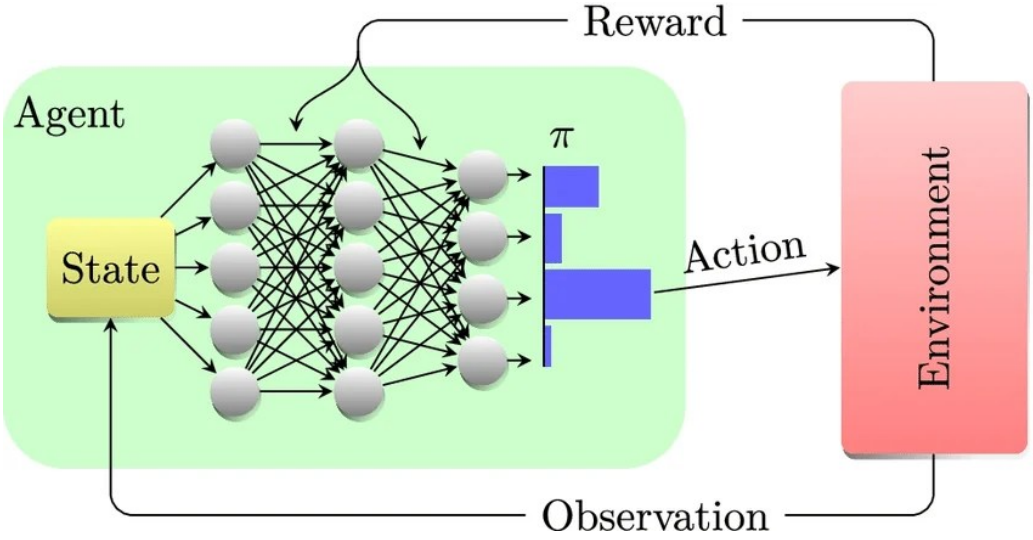



**Figura 4.** Diagrama de Deep Reinforcement Learning

## SIMULADORES DE CONDUCCIÓN DE IA

Los desarrolladores de IA se han centrado durante bastantes años en poder realizar simuladores lo más realistas posibles y recrear las diversas situaciones que pueden ocurrir en la vida real. Estas simulaciones incluyen desde recreaciones de tráfico en situaciones extremas, como pueden ser atascos, fallos mecánicos, etc, hasta programas en los que la IA puede compararse con las personas y aumentar su deep learning. En este último se encuentra un entorno que puede no ser convencional en su naturaleza,

pero que últimamente se está consolidando como un gran ambiente de aprendizaje para la IA: los videojuegos [3]. Estos ambientes contienen una característica muy interesante, que es el uso de los datos de los propios jugadores, que le sirven a la IA como referencias a la hora de poder aprender con el método del deep learning.

Una de estas IA que ha sido entrenada en videojuegos es GT Sophy. Esta IA, basada en su primera versión en el videojuego Gran Turismo Sport, es desarrollada por Sony y ha sido capaz de ser más rápido en todos las condiciones que un jugador humano[4]. El proceso que siguió Sony fue el alimentar la IA con 20 agentes en varias PS4, dando recompensas a la IA cada vez que hacía un tramo de forma correcta hasta que ya no hubo más mejora. En ese momento, el tiempo medio en esas condiciones era más rápido que el mejor jugador humano en ese momento. Esto se demostró en 2021, cuando se enfrentaron a los mejores jugadores del juego contra la IA en las modalidades de contrarreloj y carrera 1v1, con resultados favorables a GT Sophy [4].

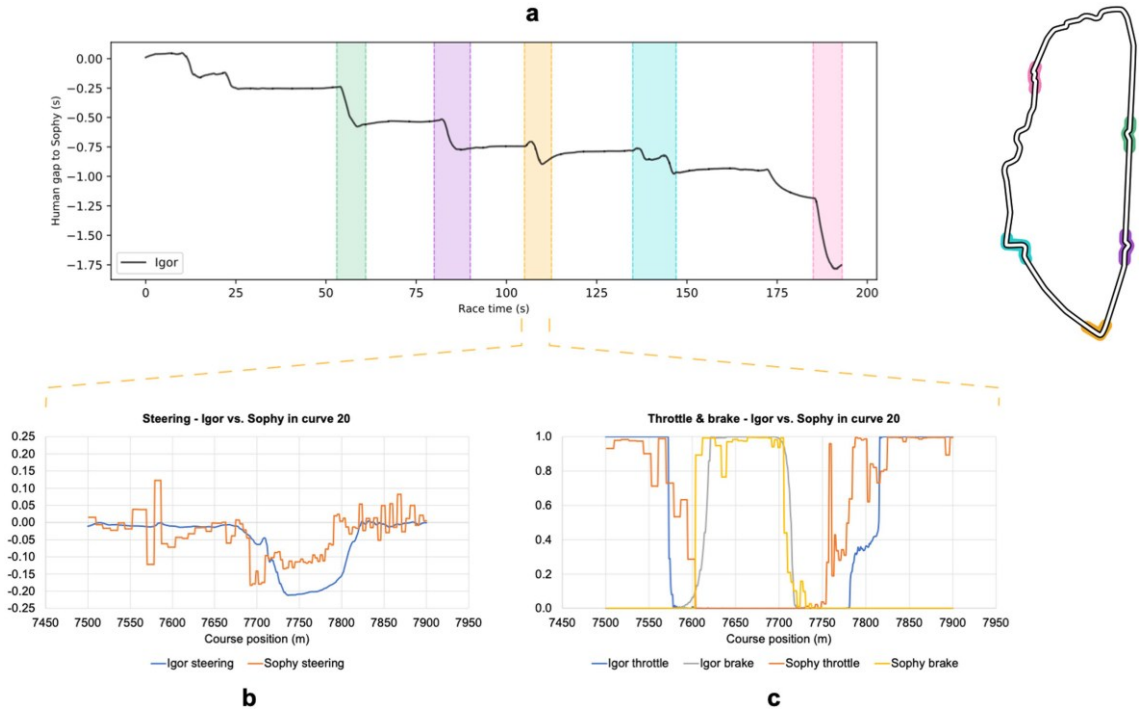



**Figura 5**. Comparación entre GT Sophy e Igor Fraga, campeón de GT World Finals en 2022. Nótese la diferencia en tiempo en la gráfica A, la diferencia de giro en la B y la del acelerador y freno en la C, estas en la zona amarilla (Curva inferior en el mapa). La IA tiene una frecuencia de movimiento de 10 Hz en la prueba.

En el artículo concedido a Nature sobre GT Sophy, los desarrolladores dijeron que en ese momento el reto al que se enfrentaban era el incluir la ética de carreras, es decir, que pudiese hacer carreras sin contactos con ningún otro coche, ya sea por su culpa o por culpa de otros pilotos, incluyendo así la capacidad de reacción a imprevistos de otros pilotos y es el foco de mejora que han seguido estos últimos años.

A día de hoy, con la versión 3.0 de GT Sophy aplicado en el contenido de pago descargable Power Pack de Gran Turismo 7, muchos jugadores de la comunidad consideran que ese objetivo está resuelto, dando una nueva dimensión a las IA de estos juegos.

### Proyecto Afeela, la aplicación a la realidad

Sony, junto a Honda, empezaron en 2023 un proyecto para crear un coche eléctrico autónomo, en el que la ayuda ya avanzada de Sophy GT en el juego ayudaría a otra IA que se aplicaría al coche y que haría que se pudiese conducir de forma automática. El desarrollo incluyó el poner el coche en el juego Gran Turismo 7 en una de sus actualizaciones, pero un cambio de rumbo de Honda hizo que el proyecto se cancelara este año. Entre otras características, se incluían 40 sensores, conexión vehículo a todos y una IA basada en Sophy GT [5].

## CONCLUSIONES

Se ha visto que ha habido una evolución grande en la IA usada en los coches autónomos, en parte gracias a la implementación del deep learning en los entrenamientos y simulaciones de esta. Con este modelo, ahora puede tener un control más preciso sobre los actuadores del coche que el ser humano, como Sophy GT en Gran Turismo 7, que puede ser de gran ayuda para la conducción autónoma.

Aunque el futuro de estas tecnologías está condicionado a las leyes de tráfico de cada país y el grado de autonomía que permitan, se puede pensar en aplicar la IA para que actúe sobre las ayudas a la conducción (ABS, control de tracción y estabilidad), ya que estos se usan en casos excepcionales en los que la IA puede tener mejor precisión y así mejorar la seguridad vial. Aun así, el coche autónomo completo como Kitt le queda aún bastante desarrollo para que se haga realidad.

## REFERENCIAS

[1] Tráfico. *Vehículos automatizados*. *https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/vehiculos-seguros/conduccion-automatizada/vehiculos-de-conduccion-automatizada/*

[2] Zhao;Zhao;Deng;Wang;Zhang;Zheng, . . . Burke. (2024). "Autonomous driving system: A comprehensive survey". *Expert Systems with Applications, v.242*, n., pp. http:dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122836

[3] Nguyen. (2024). "Exploring the Use of Artificial Intelligence in Racing Games in Engineering Education: A Systematic Literature Review". En: The Future of Engineering Education, pp.

[4] Wurman;Barrett;Kawamoto;MacGlashan;Subramanian;Walsh, . . . Kitano. (2022). "Outracing champion Gran Turismo drivers with deep reinforcement learning". *Nature, v.602*, n. 7896, pp. 223-228. http:dx.doi.org/10.1038/s41586-021-04357-7

[5] *Afeela*. *https://www.shm-afeela.com/en/*

# Ruta de simbiosis industrial para tableros reciclados de PolyAl y cáscara de arroz en aplicaciones de mobiliario urbano

**Loriente Luján, Alba**[(1)]

*(1) Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022, Valencia (España), alorluj@upv.edu.es*

## RESUMEN

Los envases multicapa posconsumo y la cáscara de arroz representan dos flujos residuales con valor material pero a menudo con opciones de valorización limitadas. El PolyAl procedente de briks alimentarios conserva una fracción polimérica aprovechable, mientras que la cáscara de arroz puede actuar como carga lignocelulósica en materiales compuestos. A partir de un trabajo previo en el que se caracterizaron diferentes composiciones de PolyAl-cáscara de arroz para aplicaciones urbanas de baja carga [1], esta comunicación propone una lectura complementaria centrada en la simbiosis industrial. El objetivo no es repetir la caracterización material, sino plantear cómo este tipo de tablero podría integrarse en una cadena de valor territorial que conecte gestores de envases multicapa, sector arrocero, empresas transformadoras, fabricantes de mobiliario urbano y administraciones locales. Se presenta una propuesta conceptual de flujos, agentes implicados, aplicaciones potenciales y barreras de transferencia. Los resultados esperados apuntan a que la viabilidad técnica inicial debe ir acompañada de ensayos normalizados, validación en servicio, análisis de ciclo de vida y estudio técnico-económico para avanzar hacia un demostrador municipal.

**Palabras clave:** PolyAl; cáscara de arroz; economía circular; simbiosis industrial; mobiliario urbano; compuestos reciclados; envases multicapa; valorización de residuos.

## INTRODUCCIÓN

La sustitución parcial de materiales plásticos convencionales continúa siendo un reto técnico, ambiental y económico. Los plásticos presentan propiedades muy favorables para numerosas aplicaciones, como baja densidad, facilidad de procesamiento, durabilidad y coste competitivo. No obstante, estas mismas características han contribuido a una elevada generación de residuos, especialmente en productos de un solo uso y en sistemas de envasado complejos. En este contexto, la economía circular plantea la necesidad de mantener el valor de los materiales durante más tiempo, reducir el uso de materias primas vírgenes y crear nuevas rutas de valorización para flujos residuales que todavía no disponen de salidas suficientemente consolidadas [2].

Los envases multicapa de bebidas, habitualmente conocidos como briks, constituyen un ejemplo representativo de esta problemática. Después de los procesos convencionales de recuperación de fibras celulósicas, queda una fracción formada principalmente por polietileno, aluminio y restos de celulosa, conocida como PolyAl. Esta fracción presenta un interés especial porque conserva una fase termoplástica potencialmente procesable, pero también plantea dificultades de reciclaje por su naturaleza multicapa y por la combinación de materiales con propiedades diferentes [2]. Por ello, el desarrollo de productos de mayor valor añadido a partir de PolyAl es una línea de interés para mejorar el aprovechamiento de los envases posconsumo.

De manera paralela, los residuos agroindustriales se han consolidado como recursos estratégicos dentro de la bioeconomía circular. La cáscara de arroz es un subproducto abundante en zonas productoras de arroz y presenta una composición lignocelulósica que permite su uso como carga o refuerzo en matrices poliméricas [3]. Aun así, su incorporación en materiales compuestos exige considerar diferentes equilibrios, puede incrementar la rigidez y la dureza del material, pero también puede favorecer una mayor absorción de agua si no se controla adecuadamente la compatibilidad entre la fase vegetal y la matriz polimérica [3].

Los compuestos tipo wood-plastic composite, o WPC, ofrecen un marco tecnológico adecuado para este tipo de desarrollos. Estos materiales combinan una fase polimérica con cargas lignocelulósicas y se utilizan habitualmente en aplicaciones como pavimentos, revestimientos, perfiles y mobiliario exterior, donde no siempre se requieren prestaciones estructurales elevadas, pero sí una combinación razonable de rigidez, durabilidad, estabilidad dimensional y procesabilidad [4]. En este sentido, la combinación de PolyAl reciclado y cáscara de arroz puede interpretarse como una vía híbrida que une reciclaje técnico y valorización agroindustrial.

Un estudio reciente demostró la posibilidad de fabricar tableros con apariencia de madera a partir de PolyAl reciclado y cáscara de arroz, utilizando una ruta de transformación basada en extrusión y moldeo por compresión [1]. El estudio permitió identificar una formulación intermedia, 70PolyAl–30cáscara de arroz, como una opción equilibrada para aplicaciones urbanas de baja carga, teniendo en cuenta propiedades mecánicas, dureza superficial y absorción de agua [1]. No obstante, el paso de un material validado a escala piloto hacia una aplicación real requiere un análisis más amplio que incluya actores, flujos, logística, condiciones de servicio e impacto ambiental.

Por este motivo, la presente comunicación no se plantea como una repetición del estudio experimental previo, sino como una propuesta de transferencia. Su aportación diferencial consiste en desplazar el foco desde la caracterización del material hacia la definición de una cadena de valor territorial basada en simbiosis industrial. El concepto de simbiosis industrial resulta especialmente adecuado, ya que permite conectar sectores que habitualmente operan de manera separada. Si estos flujos se articulan de manera coordinada, el residuo de una actividad puede convertirse en recurso para otra, generando beneficios ambientales, económicos y territoriales [5-9].

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta comunicación es proponer una ruta de simbiosis industrial para la transferencia de tableros reciclados PolyAl–cáscara de arroz hacia aplicaciones de mobiliario urbano de baja carga. Se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los principales flujos residuales implicados en la propuesta.
2. Reinterpretar la viabilidad material demostrada previamente como punto de partida para una cadena de valor circular de carácter territorial.
3. Definir los agentes que podrían participar en una red de simbiosis industrial.
4. Plantear posibles aplicaciones urbanas de baja carga.
5. Establecer las principales barreras técnicas, ambientales y económicas que deberían resolverse antes de una implantación real.
6. Proponer una hoja de ruta preliminar para avanzar desde la fabricación de tableros piloto hasta un demostrador en entorno municipal.

## RESULTADOS

Para elaborar la propuesta se realizó una lectura aplicada del estudio experimental previo [1] y de la bibliografía sobre simbiosis industrial, WPC y valorización de residuos. Los agentes se identificaron a partir de los flujos materiales necesarios y las barreras se priorizaron según su impacto en la transferencia: calidad del residuo, proceso, prestaciones, durabilidad, circularidad, economía y gobernanza. Desde este enfoque, los tableros PolyAl–cáscara de arroz se interpretan como un elemento intermedio de una cadena de valor circular: la fracción PolyAl actúa como matriz polimérica reciclada y la cáscara de arroz como carga lignocelulósica. Su combinación permitiría generar tableros con apariencia de madera para aplicaciones urbanas de baja carga, siempre que sus prestaciones se validen en condiciones reales de servicio.

La figura 1 resume la propuesta conceptual de simbiosis industrial. El punto de partida son dos flujos residuales diferenciados: por una parte, los envases multicapa posconsumo, que después de la recuperación de la fibra celulósica generan una fracción PolyAl; por otra parte, la cáscara de arroz procedente del sector agroindustrial. Estos materiales podrían confluir en una empresa transformadora capaz de formular, extruir y conformar tableros compuestos. Posteriormente, los tableros podrían integrarse en productos de mobiliario urbano fabricados por empresas especializadas o mediante colaboraciones con administraciones locales. Finalmente, el uso en espacios públicos permitiría generar información sobre durabilidad, mantenimiento, aceptación social y posibilidades de reutilización o reciclaje al final de la vida útil.

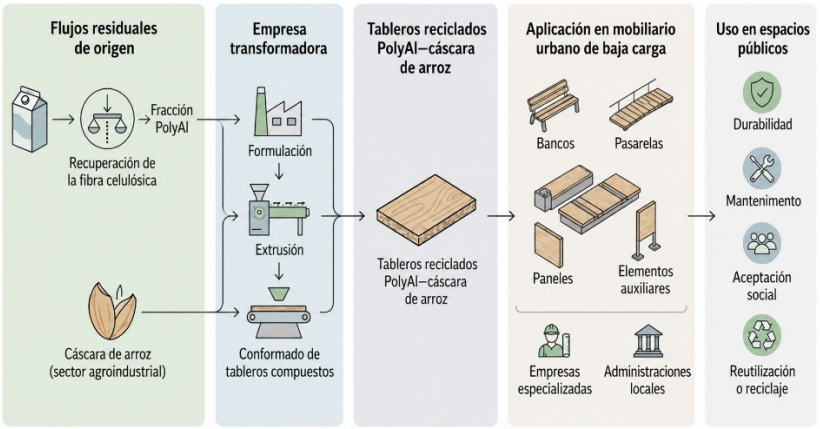



**Figura 1.** Esquema de simbiosis industrial para la valorización conjunta de PolyAl y cáscara de arroz en tableros destinados a mobiliario urbano.

Esta cadena de valor presenta diversas ventajas potenciales. En primer lugar, permite dar una salida de mayor valor añadido a una fracción compleja de los envases multicapa, que no siempre dispone de rutas de reciclaje material consolidadas [2]. En segundo lugar, incorpora un residuo agroindustrial de proximidad, la cáscara de arroz, que puede contribuir a reducir el uso de cargas minerales o de harinas de madera de origen virgen [3]. En tercer lugar, orienta el material hacia productos duraderos y visibles en el espacio público, lo que puede facilitar la sensibilización ciudadana sobre economía circular y valorización de residuos. Finalmente, la aplicación en mobiliario urbano de baja carga resulta coherente con las prestaciones esperadas de un compuesto reciclado tipo WPC, donde el criterio principal no es sustituir materiales estructurales de alta responsabilidad, sino ofrecer una alternativa viable para elementos auxiliares, bancos, paneles, pasarelas o componentes similares [4,10-12].

El trabajo experimental previo indicó que una formulación intermedia, 70PolyAl–30cáscara de arroz, presentaba un equilibrio interesante entre resistencia mecánica, rigidez, dureza superficial y absorción de agua [1]. En el marco de la presente comunicación, este resultado se puede interpretar como una ventana inicial de diseño para futuras pruebas de transferencia. Las formulaciones con mayor contenido de cáscara de arroz pueden ofrecer mayor rigidez y dureza, pero también pueden incrementar la sensibilidad a la humedad. Por el contrario, las formulaciones con mayor proporción de PolyAl pueden mejorar la resistencia a la absorción de agua, aunque con menor aportación lignocelulósica. Por tanto, la formulación intermedia no debe entenderse como una solución definitiva, sino como un punto de partida razonable para fabricar prototipos y someterlos a validaciones normalizadas.

Desde el punto de vista de los agentes implicados, la propuesta requiere una coordinación mínima entre diferentes perfiles. Los gestores de residuos y plantas de recuperación deberían garantizar la disponibilidad y calidad de la fracción PolyAl. El sector arrocero aportaría la cáscara de arroz, que debería ser acondicionada mediante secado, molienda y control granulométrico. Las empresas transformadoras deberían ajustar la formulación, el procesamiento y el control de calidad de los tableros. Los fabricantes de mobiliario urbano podrían adaptar el diseño de los productos a las prestaciones reales del material. Finalmente, las administraciones locales tendrían un papel clave como usuarias iniciales, facilitando espacios de demostración, requisitos de compra pública innovadora y seguimiento del comportamiento en servicio.

Esta coordinación entre agentes no elimina, sin embargo, la necesidad de identificar las principales barreras de transferencia antes de avanzar hacia una aplicación real. Por este motivo, la figura 2 sintetiza las dimensiones clave desde la escala piloto hasta un posible uso en mobiliario urbano. Las barreras se relacionan con aspectos materiales, de procesamiento, prestaciones, durabilidad, aplicación urbana, circularidad, economía y gobernanza, y se vinculan con las acciones necesarias para reducir la incertidumbre técnica, ambiental y organizativa.

| Dimensión | Barrera principal | Acción necesaria |
|---|---|---|
| Material | Variabilidad del PolyAl y de la cáscara de arroz según origen, humedad y granulometría | Establecer especificaciones mínimas de recepción y protocolos de acondicionamiento |
| Procesamiento | Posible heterogeneidad de la mezcla y dificultad de consolidación en tableros de gran formato | Optimizar extrusión, temperatura, presión, tiempo de enfriamiento y compatibilización |
| Prestaciones mecánicas | Necesidad de datos normalizados para comparación con WPC comerciales o madera tratada | Realizar ensayos normalizados de flexión, tracción, impacto, fluencia y fatiga |
| Durabilidad | Incertidumbre sobre el comportamiento a largo plazo en exterior | Aplicar protocolos de envejecimiento UVA/UVB, humedad, ciclos mojado-secado y abrasión |
| Aplicación urbana | Adaptación del diseño del mobiliario a las capacidades reales del material | Diseñar elementos de baja carga con criterios de seguridad, mantenimiento y sustitución |
| Circularidad | Falta de indicadores ambientales comparativos | Desarrollar un análisis de ciclo de vida y estimar reducción de residuos y materia prima virgen |
| Economía | Incertidumbre sobre costes de recogida, acondicionamiento, procesamiento y fabricación | Realizar un estudio técnico-económico y comparar con alternativas comerciales |
| Gobernanza | Necesidad de coordinación entre empresas y administraciones | Crear un consorcio o proyecto piloto con roles, responsabilidades y flujos definidos |

**Figura 2.** Barreras y acciones para la transferencia de tableros PolyAl-cáscara de arroz.

A partir de estas barreras, se propone una hoja de ruta en cuatro fases. La primera fase correspondería a la consolidación técnica del material, mediante la fabricación de lotes piloto y la repetición de ensayos mecánicos y físicos bajo condiciones normalizadas. La segunda fase se centraría en la validación de durabilidad, incorporando ensayos de envejecimiento acelerado más representativos de la exposición exterior, así como

pruebas de absorción de agua, estabilidad dimensional, abrasión y comportamiento frente a cargas sostenidas. La tercera fase consistiría en el desarrollo de prototipos de mobiliario urbano de baja carga, como tableros para bancos, paneles auxiliares o pequeñas pasarelas. La cuarta fase debería abordar la implantación de un demostrador municipal, con seguimiento del comportamiento real, registro de incidencias, mantenimiento y percepción de las personas usuarias.

Este planteamiento permite diferenciar claramente entre viabilidad material y transferencia industrial. Un material puede mostrar propiedades prometedoras en un entorno controlado, pero su adopción real depende también de factores logísticos, normativos, ambientales, económicos y sociales. En este sentido, la simbiosis industrial no debe entenderse solo como una suma de residuos, sino como una arquitectura de colaboración. El valor del sistema aparece cuando los flujos de material, la capacidad de procesamiento, el diseño del producto y la demanda pública se conectan de manera estable.

Además, la propuesta puede contribuir a objetivos más amplios de sostenibilidad. La valorización conjunta de PolyAl y cáscara de arroz puede reducir el envío de residuos a vertedero o a usos de bajo valor, disminuir parcialmente el consumo de materias primas vírgenes y generar productos con una narrativa circular fácilmente comprensible para la ciudadanía. No obstante, estas contribuciones deben cuantificarse antes de formular afirmaciones ambientales concluyentes. Por ello, el análisis de ciclo de vida, el estudio técnico-económico y la validación en servicio deberían formar parte de cualquier fase posterior de desarrollo.

En conjunto, los resultados de esta propuesta muestran que los tableros PolyAl–cáscara de arroz pueden actuar como nodo material de una red de simbiosis industrial. Su función no sería únicamente sustituir un material convencional, sino conectar residuos de origen urbano y agroindustrial con una aplicación territorial concreta. Esta lectura refuerza el potencial del material como herramienta de transferencia hacia modelos productivos más circulares desde una perspectiva prudente y basada en validaciones técnicas futuras.

## CONCLUSIONES

La valorización conjunta del PolyAl procedente de envases multicapa y de la cáscara de arroz permite plantear una vía de trabajo coherente con los principios de la economía circular y la simbiosis industrial. A diferencia de otras estrategias centradas en un único flujo residual, esta propuesta conecta un residuo urbano-industrial complejo con un subproducto agroindustrial abundante, generando una posible materia prima secundaria para tableros reciclados destinados a aplicaciones urbanas de baja carga.

La principal aportación de esta comunicación es la reinterpretación de un caso de viabilidad material como posible cadena de valor territorial. Los tableros PolyAl–cáscara de arroz no se analizan aquí únicamente como un compuesto reciclado, sino como un nodo de conexión entre gestores de envases, sector arrocero, empresas transformadoras, fabricantes de mobiliario urbano y administraciones locales. Esta lectura permite pasar de una aproximación centrada en el material a una aproximación orientada a la transferencia.

Los resultados disponibles indican que la formulación intermedia 70PolyAl–30cáscara de arroz puede constituir un punto de partida adecuado para futuros prototipos, ya que ofrece un compromiso razonable entre prestaciones mecánicas, dureza superficial y absorción de agua [1]. No obstante, esta formulación no debe interpretarse todavía

como una solución final para uso exterior, sino como una base inicial que requiere validaciones adicionales antes de una implantación real.

Entre las acciones futuras prioritarias destacan la realización de ensayos normalizados de flexión, impacto, fluencia, fatiga, abrasión y estabilidad dimensional; la aplicación de protocolos de envejecimiento más representativos de la exposición exterior; el desarrollo de un análisis de ciclo de vida; el estudio técnico-económico del proceso; y la fabricación de un demostrador municipal que permita evaluar el comportamiento del material en condiciones reales de servicio.

En conclusión, los tableros PolyAl–cáscara de arroz presentan potencial como producto circular para mobiliario urbano de baja carga, pero su interés principal reside en la capacidad de articular una red de colaboración entre sectores. Esta propuesta puede contribuir a crear sinergias entre reciclaje, agroindustria, transformación de materiales y administración pública, siempre que la validación técnica, ambiental y económica avance de manera coordinada.

## REFERENCIAS


[1] Loriente Lujan, Alba; Pérez Puig, Miguel Ángel; Salas, Fidel; y Loriente, Oscar; (feb. 2026). «Mechanical and Durability Performance of Recycled Tetra Pak PolyAl–Rice Husk Wood-like Boards for Urban Furniture». *Journal of Composites Science*. vol. 10, n.º 2, doi: 10.3390/jcs10020114.

[2] Robertson, Gordon L.; «Recycling of aseptic beverage cartons: A review», *Recycling*, vol. 6, n.º 1. MDPI AG, 2021. doi: 10.3390/RECYCLING6010020.

[3] Suhot, Mohamed Azlan; Hassan, Mohamad Zaki; Aziz, Sa'ardin Abdul; y Md Daud, Mohd Yusof; (ago. 2021). «Recent progress of rice husk reinforced polymer composites: A review». *Polymers (Basel).* vol. 13, n.º 15, doi: 10.3390/polym13152391.

[4] Gardner, Douglas J.; Han, Yousoo; y Wang, Lu; (sep. 2015). «Wood–Plastic composite technology». *Current Forestry Reports*. vol. 1, n.º 3. pp. 139-150, doi: 10.1007/s40725-015-0016-6.

[5] Taddeo, Raffaella; Simboli, Alberto; Ioppolo, Giuseppe; y Morgante, Anna; (ene. 2017). «Industrial symbiosis, networking and innovation: The potential role of innovation poles». *Sustainability (Switzerland)*. vol. 9, n.º 2, doi: 10.3390/su9020169.

[6] Fraccascia, Luca; y Giannoccaro, Ilaria; (jun. 2020). «What, where, and how measuring industrial symbiosis: A reasoned taxonomy of relevant indicators». *Resour. Conserv. Recycl.* vol. 157, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104799.

[7] Neves, Angela; Godina, Radu; Azevedo, Susana G.; y Matias, João C. O.; «A comprehensive review of industrial symbiosis», *Journal of Cleaner Production*, vol. 247. Elsevier Ltd, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119113.

[8] «Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva», 2020. Accedido: may 12, 2026. [En línea]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098.

[9] (2015). «Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible», Accedido: may 12, 2026. [En línea]. Disponible en: https://docs.un.org/es/A/RES/70/1.

[10] Martínez-Barrera, Gonzalo; *et al.*; (2015). «Waste cellulose from tetra pak packages as reinforcement of cement concrete». *Advances in Materials Science and Engineering*. vol. 2015, doi: 10.1155/2015/682926.

[11] Bal, Bekir Cihad; (2022). «Mechanical Properties of Wood-plastic Composites Produced with Recycled Polyethylene, Used Tetra Pak Boxes and Wood Flour». *Journal of Bioresources and Bioproducts*. n.º 17, doi: 10.15376/biores.17.4.6569-6577.

[12] Bal, Bekir Cihad; y Narlıoğlu, Nasır; «Physical and mechanical properties of composite material produced from waste plastic furniture and waste beverage boxes.». 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-4479914/v1.

# Cuando converger no basta: una comparación dinámica de métodos iterativos con y sin derivadas para ecuaciones no lineales con raíces complejas

**Chicharro, Francisco I., Garrido, Neus**
*I.U. Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, 46022 València, Spain, {frachilo,neugarsa}@mat.upv.es*

## RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento dinámico de distintos métodos iterativos para la resolución de ecuaciones no lineales con raíces complejas, prestando especial atención a la comparación entre esquemas con derivadas y sus correspondientes versiones sin derivadas. El estudio se fundamenta en el análisis de los operadores racionales asociados a cada método, considerando la influencia de elementos clave como los puntos fijos extraños y los puntos críticos libres en la estabilidad y convergencia.

Se examinan métodos clásicos como Newton y Steffensen, así como composiciones de ambos, evaluando su rendimiento mediante la representación de planos dinámicos que ilustran las cuencas de atracción. Además, se extiende el análisis a problemas con raíces múltiples y a sistemas de ecuaciones no lineales.

Los resultados muestran diferencias significativas entre métodos, evidenciando que la eliminación de la derivada puede introducir comportamientos dinámicos más complejos, como la aparición de regiones de no convergencia o la convergencia hacia puntos no deseados. Este enfoque permite comprender mejor la estabilidad global de los métodos y proporciona criterios útiles para su selección en aplicaciones científicas y de ingeniería.

**Palabras clave:** métodos iterativos, ecuaciones no lineales, planos dinámicos, análisis de estabilidad, computación.

## INTRODUCCIÓN

La resolución de ecuaciones no lineales de la forma $f(x) = 0$, donde $f: D \subseteq \mathbb{R} \to \mathbb{R}$, ha constituido durante largo tiempo un problema complejo en numerosas áreas de la Ciencia y la Ingeniería. Aunque el método de Newton tiene su origen en el siglo XVII, no es hasta finales del siglo XX cuando el desarrollo de la computación impulsa de manera decisiva la investigación en el ámbito de los métodos iterativos. En la literatura reciente pueden encontrarse cientos de trabajos dedicados a esta temática.

Una primera clasificación distingue entre métodos con o sin derivadas, con o sin memoria, orientados a la obtención de raíces simples o múltiples. La diversidad de contribuciones en este campo es muy amplia y, además, la estabilidad de los procedimientos iterativos ha sido objeto de análisis en numerosos estudios.

Dentro del análisis dinámico, los puntos que van a afectar a la estabilidad del método son los puntos fijos extraños y los puntos críticos libres [1,2]. Los puntos fijos extraños son aquellos puntos que permanecen invariantes ante la aplicación del operador racional y no coinciden con las raíces; estos puntos serán problemáticos cuando sean

atractores, es decir, que la derivada del operador racional en el punto esté en el intervalo $(-1,1)$. Los puntos críticos libres son aquellos puntos que anulan la derivada del operador racional y no coinciden con las raíces.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es analizar y comparar el comportamiento dinámico de distintos métodos iterativos para la resolución de ecuaciones no lineales con raíces complejas, prestando especial atención a las diferencias entre métodos con derivadas y sin derivadas.

De forma más específica, se persiguen los siguientes objetivos:

- Estudiar la estabilidad de diversos métodos iterativos mediante el análisis de sus operadores racionales asociados.
- Identificar y caracterizar la influencia de los puntos fijos extraños y los puntos críticos libres en la convergencia de los métodos.
- Comparar el rendimiento dinámico de métodos clásicos con derivadas (de tipo Newton) frente a sus versiones sin derivadas (de tipo Steffensen).
- Analizar el efecto de la composición de métodos en el orden de convergencia y en la estabilidad global del proceso iterativo.
- Evaluar el comportamiento de estos métodos tanto en problemas con raíces simples como múltiples, así como en sistemas de ecuaciones no lineales.
- Visualizar y contrastar las cuencas de atracción mediante planos dinámicos para interpretar de manera gráfica las propiedades de convergencia.

## RESULTADOS

Para realizar la comparación entre métodos iterativos con y sin derivadas vamos a estudiar diferentes versiones de métodos basados en Newton como métodos con derivadas y su alternativa reemplazando la derivada por una diferencia dividida.

En todos los casos vamos a representar los planos dinámicos, que muestran las cuencas de atracción de cada una de las raíces de la ecuación no lineal. Las representaciones las hemos realizado utilizando Matlab R2026a, tomando 200 estimaciones iniciales en el rango $[-5,5]$ tanto en abscisas como en ordenadas. Hemos considerado que se alcanza la convergencia cuando la diferencia entre el iterado y la solución es menor a $10^{-6}$. La convergencia a las raíces se representa en azul y naranja, mientras que la convergencia a algún punto distinto a las raíces se ilustra en negro. Mostramos con estrellas blancas las raíces del polinomio, con cuadrados blancos los puntos fijos extraños y con círculos blancos los puntos críticos libres.

### Estabilidad de métodos para resolver ecuaciones no lineales con raíces simples

En esta primera comparativa vamos a trabajar con los métodos de Newton y Steffensen. El método de Newton (N1) es ampliamente conocido y viene dado por la expresión

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \qquad k = 0,1,\dots$$

El método de Steffensen (S1) reemplaza la derivada del método de Newton por una diferencia dividida como podemos ver en

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f[w_k, x_k]}, \qquad k = 0,1, \ldots,$$

donde $w = x + f(x)$. Ambos métodos tienen convergencia cuadrática.

Al aplicar ambos métodos sobre el polinomio $p(z) = z^2 + 1$ observamos que el operador racional asociado a N1 no tiene puntos que comprometan su convergencia; sin embargo, el método S1 tiene un punto crítico libre en $z = -3$.

La Figura 1 muestra los planos dinámicos de ambos métodos.




**Figura 1.** Planos dinámicos de los métodos (a) N1 y (b) S1

El plano dinámico correspondiente a N1 tiene la mejor estabilidad posible, puesto que cada estimación inicial converge a su raíz más próxima, y todo el plano converge a alguna raíz. En el caso de S1, el punto crítico libre pertenece a la cuenca de atracción del infinito y, por tanto, hay una amplia región negra en la que las estimaciones iniciales no convergen a las raíces.

La composición de métodos [3] obtiene un orden de convergencia $\rho = \rho_1 \cdot \rho_2$, donde $\rho_1$ y $\rho_2$ son los órdenes de convergencia de los métodos individuales. En este apartado vamos a analizar las posibles composiciones de dos pasos entre N1 y S1. En concreto, N2 será la composición de N1 consigo mismo, S2 la composición de S1 consigo mismo, NS la composición de N1 como primer paso y S1 como segundo paso, y SN tomará como primer paso a S1 y como segundo paso a N1.

El método N2 presenta puntos fijos extraños en $z = \pm\frac{\sqrt{3}}{3}$, pero al ser repulsores no debilitan la estabilidad.

El método NS tiene cuatro puntos fijos extraños, de los cuales sólo $z \approx -5.5708$ es atractor; los puntos críticos libres $z = -3 \pm \sqrt{10}$ pertenecen a la cuenca de atracción del atractor extraño.

El método SN tiene también cuatro puntos fijos extraños, siendo sólo $z \approx -2.6956$ atractor; los puntos críticos libres $z = -1 \pm i$ pertenecen a las cuencas de atracción de $z = \pm i$, mientras que $z = -3$ está en la cuenca del atractor extraño.

Por último, el único de los métodos de dos pasos sin derivadas, S2, tiene seis puntos fijos extraños, todos ellos repulsores. De los seis puntos críticos libres, $z \approx -0.3494, z = -3$ y $z \approx -1.8253 \pm i1.5469$ pertenecen a la cuenca del infinito.

La Figura 2 muestra los planos dinámicos de los métodos de dos pasos.

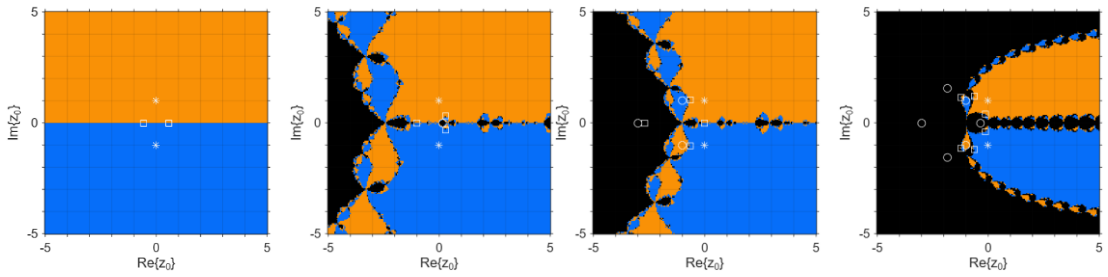



**Figura 2.** Planos dinámicos de los métodos (a) N2, (b) NS, (c) SN, (d) S2

Observamos en N2 un comportamiento similar a N1, donde cada estimación inicial converge a la raíz más próxima, salvo los puntos fijos extraños que permanecen por definición en el mismo lugar. Los métodos NS y SN introducen un paso sin derivadas. Se puede observar dicho efecto con las regiones negras de sus planos dinámicos, dada la presencia de puntos fijos extraños atractores que dificultan la convergencia de estimaciones iniciales en dichas regiones. El método S2, libre de derivadas, no contiene puntos fijos extraños atractores pero, en cambio, la presencia de puntos críticos libres hace que parte de las estimaciones iniciales converja al infinito.

## Estabilidad de métodos para resolver ecuaciones no lineales con raíces múltiples

Los métodos para resolver ecuaciones no lineales ven reducido su orden de convergencia cuando éste se aplica sobre problemas que contienen raíces múltiples; por ejemplo, el método N1 pasa de converger cuadrática a linealmente. Schröder [4] planteó una modificación basada en el conocimiento de la multiplicidad $m$, dando lugar al método que denotaremos por Nm

$$z_{k+1} = z_k - m\frac{f(z_k)}{f'(z_k)}, \qquad k = 0,1, \ldots,$$

que garantiza el orden cuadrático de convergencia. De forma análoga a los apartados anteriores, transformamos este método con derivadas en uno sin derivadas reemplazando la derivada por la diferencia dividida, dando lugar al método Sm cuya expresión es

$$z_{k+1} = z_k - m\frac{f(z_k)}{f[w_k, z_k]}, \qquad k = 0,1, \ldots,$$

donde $w = z + f(z)$.

Aplicamos ambos métodos sobre el polinomio $p(z) = (z - i)^2(z + i)$, que tiene una raíz doble y una raíz simple. El operador racional asociado a Nm no presenta puntos fijos extraños pero sí un punto crítico libre en $z = -i\frac{5}{3}$, que pertenece a la cuenca de la raíz $z = -i$. El operador asociado a Sm no incluye puntos fijos extraños; no obstante, aparecen puntos críticos libres que no pertenecen a la cuenca de las raíces en $z \approx -i0.3994, z \approx -i0.8583, z \approx -i1.4496, z \approx i1.8694, z \approx 0.6638 \pm i1.7053$ y $z \approx \pm 0.7547 + i2.2545$.

La Figura 3 muestra los planos dinámicos de los métodos para raíces múltiples. En este caso hemos aumentado el número máximo de iteraciones a $10^6$ y bajado la diferencia entre el iterado y la solución a $10^{-2}$ para que se observen las cuencas de atracción, dado que la raíz simple, representada en azul, tiene convergencia extremadamente lenta.




**Figura 3.** Planos dinámicos de los métodos (a) Nm, (b) Sm

Los puntos críticos libres de Sm con parte real nula convergen muy lentamente a las raíces, mientras que $z \approx 0.6638 \pm i1.7053$ y $z \approx \pm 0.7547 + i2.2545$ tienen una convergencia lenta al infinito.

**Estabilidad de métodos para resolver sistemas de ecuaciones no lineales con raíces simples**

La última comparativa la establecemos entre los métodos de Newton (NN) para sistemas de ecuaciones no lineales

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \left[F'\left(x^{(k)}\right)\right]^{-1} F\left(x^{(k)}\right), \qquad k = 0,1,\ldots$$

y Steffensen (SS) para sistemas de ecuaciones no lineales

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \left[x^{(k)}, w^{(k)}; F\right]^{-1} F\left(x^{(k)}\right), \qquad k = 0,1,\ldots,$$

donde $w = x + F(x)$. Ambos métodos mantienen la convergencia cuadrática. Trabajaremos con el caso $F: D \subseteq \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2$, aunque todos los resultados son generalizables a $n$ dimensiones.

Aplicamos ambos métodos sobre el polinomio $p(x) = \begin{pmatrix} x_1^2 + x_2^2 - 1 \\ x_1^2 - x_2^2 - \frac{1}{2} \end{pmatrix}$, que tiene cuatro raíces en $(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(\pm\sqrt{3}, \pm 1)$. El operador racional asociado a NN no presenta puntos fijos extraños ni críticos libres. El operador asociado a SS no incluye puntos fijos extraños; no obstante, aparecen 14 puntos críticos libres que no pertenecen a la cuenca de las raíces.

La Figura 4 muestra los planos dinámicos de los métodos para sistemas no lineales. En este caso,los ejes de abscisas y ordenadas representan las coordenadas reales $x_1$ y $x_2$ de cada punto, respectivamente. Cada uno de los colores diferentes del negro denotan las cuencas de atracción de las cuatro raíces de $p(x)$.




**Figura 4.** Planos dinámicos de los métodos (a) NN, (b) SS

Podemos observar cómo la presencia de puntos críticos libres afecta negativamente a la convergencia del método.

## CONCLUSIONES

Los resultados muestran que los métodos con derivadas presentan, en general, una mayor estabilidad global, con cuencas de atracción más regulares y ausencia o escasa influencia de comportamientos no deseados. Por el contrario, los métodos sin derivadas introducen con frecuencia puntos críticos libres que generan regiones de no convergencia a las raíces o divergencia. En consecuencia, aunque ambos tipos de métodos pueden compartir el mismo orden de convergencia, los métodos con derivadas resultan más robustos y fiables desde el punto de vista dinámico.

## AGRADECIMIENTOS

Financiado por la Convocatoria de Apoyo a la Investigación IMM 2026 – Instituto Universitario de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València.

## REFERENCIAS

[1] Blanchard, P. (1984). "Complex analytic dynamics on the Riemann sphere". *Bull. American Math. Soc.*, v. 11, p.p. 85-141.

[2] Devaney, R. L. (1984). *An introduction to chaotic dynamical systems*. Editado por: Addison-Wesley.

[3] Ortega, J.M.; Rheinboldt, W.G. (1970). Iterative Solutions of Nonlinear Equations in Several Variables. New York, Academic Press

[4] Schröder, E. O. (1870). “On infinitely many algorithms for solving equations”. *Math. Ann.*, v. 2, pp. 317-365.

# Caracterización de Especies en Lías de Vino tras su Fraccionamiento mediante Ultrafiltración

**Reig-Valor, Miguel-Jorge[(1)], Torregrosa-Sánchez, Maya[(1)], Ferri, J.M.[(2)], López-Pérez, Maria-Fernanda[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell, s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España, e-mail: mjreival@epsa.upv.es*

*(2) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España*

## RESUMEN

En la actualidad, el sector agroindustrial está evolucionando hacia un modelo de economía circular en el que los subproductos generados se revalorizan para reducir su impacto ambiental y generar productos de alto valor añadido. En este contexto, la industria vitivinícola española produce grandes cantidades de residuos como orujos, semillas y lías de vino, estas últimas habitualmente destinadas a usos de bajo valor como la alimentación animal. Sin embargo, su elevado contenido en compuestos bioactivos, especialmente polifenoles, proteínas y otros metabolitos de interés, las convierte en una fuente potencial para su valorización. En este trabajo se propone la utilización de tecnologías de membranas como estrategia sostenible para la separación y fraccionamiento selectivo de estas especies, permitiendo su concentración sin el uso de disolventes orgánicos. En particular, se estudia el empleo de membranas de ultrafiltración de 15 kDa para el tratamiento de lías de vino, evaluando su capacidad de separación en función del tamaño molecular, así como su comportamiento hidráulico, selectividad y reproducibilidad del proceso. Asimismo, se analiza la recuperabilidad de las membranas mediante protocolos de limpieza, con el fin de garantizar su reutilización y viabilidad a escala industrial.

**Palabras clave:** lías de vino, ultrafiltración, polifenoles, economía circular, fraccionamiento selectivo.

## INTRODUCCIÓN

El sector vitivinícola genera grandes volúmenes de subproductos, con una producción en España de 34–37 millones de hectolitros en la campaña 2024–2025. Esto implica decenas de millones de toneladas de residuos, considerando una generación media de 1.3–1.5 kg por litro de vino. Entre ellos, las lías representan aproximadamente el 10–14 % y se destinan actualmente a usos de bajo valor añadido como compostaje o alimentación animal [1,2]. Sin embargo, las lías constituyen una matriz rica en compuestos bioactivos, especialmente polifenoles, junto con proteínas y metabolitos de levaduras. Estos compuestos presentan propiedades antioxidantes e inflamatorias relevantes, lo que les confiere interés en sectores como el cosmético, farmacéutico y alimentario [3]. Su aprovechamiento industrial sigue siendo limitado debido a la complejidad de la matriz.

Las técnicas convencionales de extracción presentan limitaciones ambientales y energéticas, mientras que la tecnología de membranas ofrece una alternativa sostenible

y selectiva para la purificación y fraccionamiento. No obstante, su aplicación a lías de vino sigue siendo incipiente por problemas de ensuciamiento. En este trabajo se propone el uso de ultrafiltración (UF) como pretratamiento para obtener fracciones enriquecidas en polifenoles de bajo peso molecular, posteriormente concentradas mediante nanofiltración (NF), mejorando la eficiencia y viabilidad del proceso.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio radica en el análisis holístico de las lías de vino, incluyendo especies fenólicas, azúcares y proteínas, y de las obtenidas tras una etapa de tratamiento de membranas de 15 kDa para su purificación.

Asimismo, se plantean diferentes subobjetivos para la compleción de este objetivo principal. Entre ellos, verificar la reproducibilidad de ensayos empleando diferentes membranas de idéntico tamaño molecular y material, caracterizar las membranas atendiendo a su permeabilidad hidráulica, identificar los índices de rechazo y factores de concentración para cada especie analizada, observar el flujo de permeado resultante tras la filtración de las lías y evaluar la recuperabilidad de las membranas tras la aplicación de una limpieza química.

## MATERIAL Y METODOLOGÍA

Las lías de vino empleadas para el estudio procedieron de una industria vitivinícola de la Comunidad Valenciana. Éstas fueron centrifugadas a 10,000 rpm para separar la fase sólida y líquida de la matriz. Posteriormente, el sobrenadante extraído fue filtrado por un filtro de hilos de 1.0 µm para eliminar las partículas más pequeñas todavía presentes en las lías. Las membranas utilizadas fueron manufacturadas por Biosnar (Guipúzcoa, España), y consistían de 3 membranas de un tamaño de corte molecular de 15 kDa de $Al_2O_3$, de 1,178 mm de longitud, 19 canales y un área activa equivalente de 0.24 $m^2$. Estas membranas fueron caracterizadas inicialmente con agua destilada a diferentes temperaturas (20, 25 y 30 ºC) y presiones transmembranales (TMP) de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 bar a una velocidad de flujo tangencial (CFV) de 3.8 m/s.

La filtración de las lías de vino se realizó a unas condiciones de 20 ºC, a una PTM constante de 2 bar y a una CFV equivalente entre los 5.86 y 6.21 m/s, en un sistema donde se recirculaba el rechazo recopilado. Se partió de un volumen inicial de lías de 8 L, alcanzando un factor de reducción de volumen (FRV) mínimo de 2.28. La filtración se llevó a cabo en una planta piloto manufacturada por Likuid Nanotech S.L., y para la recopilación de datos se empleó una balanza Kern PLS de 4,200 ± 0.01 g de capacidad (Balingen, Alemania) haciendo uso de la interfaz LabView.

Tras la caracterización de las membranas y filtración de las lías, éstas fueron sometidas al siguiente protocolo de limpieza. Inicialmente, se lavaron las membranas con agua destilada para eliminar cualquier resto remanente de lías dentro del circuito. Posteriormente, una limpieza alcalina con NaOH de 15 g/L fue llevada a cabo durante 30 minutos a una temperatura de 45 ºC para eliminar cualquier resto orgánico que quede en la membrana. Seguidamente, la membrana se enjuagó con agua y se recirculó una disolución ácida de HCl a un pH de 2 durante 30 minutos a 45 ºC. Finalmente, la membrana fue lavada con agua destilada hasta alcanzar la neutralidad en todo el sistema. Durante toda la limpieza la CFV se mantuvo a 6.5 m/s.

Respecto a la analítica, a diferentes tiempos de filtración se analizaron como especies de interés el contenido de polifenoles totales (TPC), en base del Tirosol y Ácido Gálico en mg equivalentes/L; actividad antioxidante total (TAA) en mM Trolox equivalentes; azúcares totales (TSC) en mg de Glucosa equivalentes/L; flavonoides totales (TFC) en mg de Quercetina equivalentes/L; y proteínas totales (TPrC) en mg de BSA equivalentes/L. Dada la naturaleza colorimétrica de estas técnicas, se empleó un Espectrofotómetro Thermo Spectronic Helios δ (Waltham, MA, USA) para la lectura de absorbancias de las muestras. Para evaluar la selectividad de las membranas a estas especies, se determinó su índice de rechazo (R) según la ecuación (1).

$$R\ (\%) = 1 - \frac{C_{P,i}}{C_{A,i}} \quad (1)$$

Donde $C_{A,i}$ es la concentración en el alimento de la especie $i$ y $C_{P,i}$ es la concentración en el permeado de la especie $i$.

## RESULTADOS

### Caracterización inicial de las membranas de 15 kDa

Las membranas utilizadas para este estudio fueron caracterizadas tomando agua destilada como fluido de trabajo. El flujo de permeado fue registrado y el promedio fue calculado, Finalmente, la permeabilidad hidráulica fue determinada mediante un ajuste lineal ajustando el flujo de permeado frente a la TMP. Los resultados obtenidos para cada membrana y temperatura se recopilan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Permeabilidades hidráulicas a diferentes temperaturas de las membranas estudiadas.

| Temperatura (ºC) | Permeabilidad (L/m²·h·bar) | | |
|---|---|---|---|
| | Membrana 1 | Membrana 2 | Membrana 3 |
| 20 | 184 ± 10 | 268 ± 14 | 287 ± 11 |
| 25 | 203 ± 11 | 297 ± 14 | 321 ± 14 |
| 30 | 246 ± 18 | 313 ± 16 | 351 ± 15 |

En primer lugar, el comportamiento de las permeabilidades resulta coherente, con un incremento relativamente proporcional a medida que se aumenta la temperatura. Asimismo, los valores obtenidos se encuentran en el mismo orden de magnitud proporcionado por el fabricante, de 200 ± 30 L/m²·h·bar. Por otro lado, tal y como se observa, las membranas presentan cierta variabilidad en su permeabilidad hidráulica. Este aspecto debe considerarse de cara a un posible escalado industrial, ya que las diferencias en el comportamiento de las membranas pueden traducirse en una disminución del rendimiento del proceso. No obstante, esta variabilidad será más evidente durante la filtración de las lías de vino.

### Ensayos de filtración de las lías de vino

Los resultados del flujo de permeado promedio obtenidos tras la filtración de las lías de vino se muestran en la Figura 1, junto a los tiempos tomados para la adquisición de muestras para analizar.

Los ensayos realizados presentaron medidas de flujo de permeado similares entre sí, lo que confirma la reproducibilidad de resultados. Por lo tanto, a pesar de las diferencias

en la permeabilidad hidráulica anteriormente registrada, las interacciones entre la membrana y la matriz de las lías conducen a flujos de permeado semejantes en condiciones reales de operación. Los ensayos se inician con un flujo de permeado de partida en torno a 70 L/m$^2$·h, mientras que, tras 25 minutos, el flujo disminuye un 53 % hasta alcanzar un flujo de permeado de 30 L/m$^2$·h, aproximadamente.

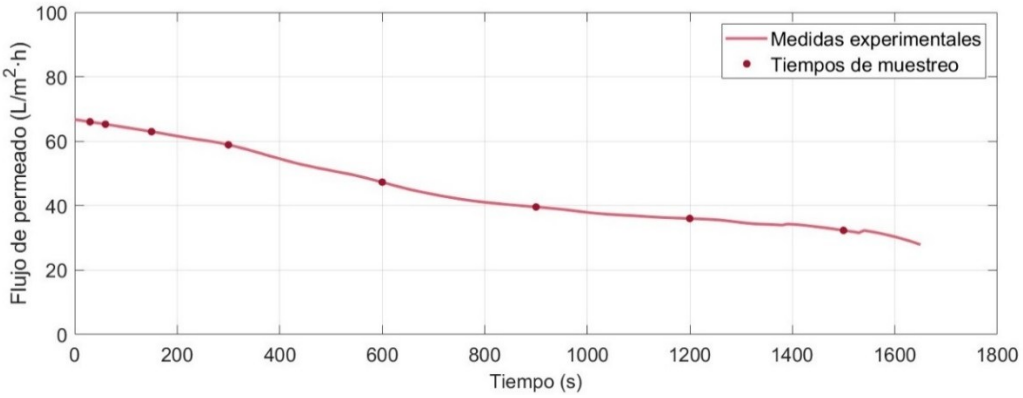



**Figura 1.** Flujo de permeado promedio obtenido de la filtración de las lías de vino a través de membranas de 15 kDa. ─ Medidas experimentales, • Tiempos de muestreo.

### Análisis de especies en las corrientes de alimento, permeado y rechazo

En cuanto al análisis de especies presentes en las lías de vino, quizá el aspecto más relevante de este estudio, se tomaron muestras del alimento inicial de cada ensayo, junto a muestras de permeado y rechazo para cada instante medido (visualizados en la Figura 1). Las medidas de concentración determinadas experimentalmente se muestran en el conjunto de gráficas de la Figura 2.

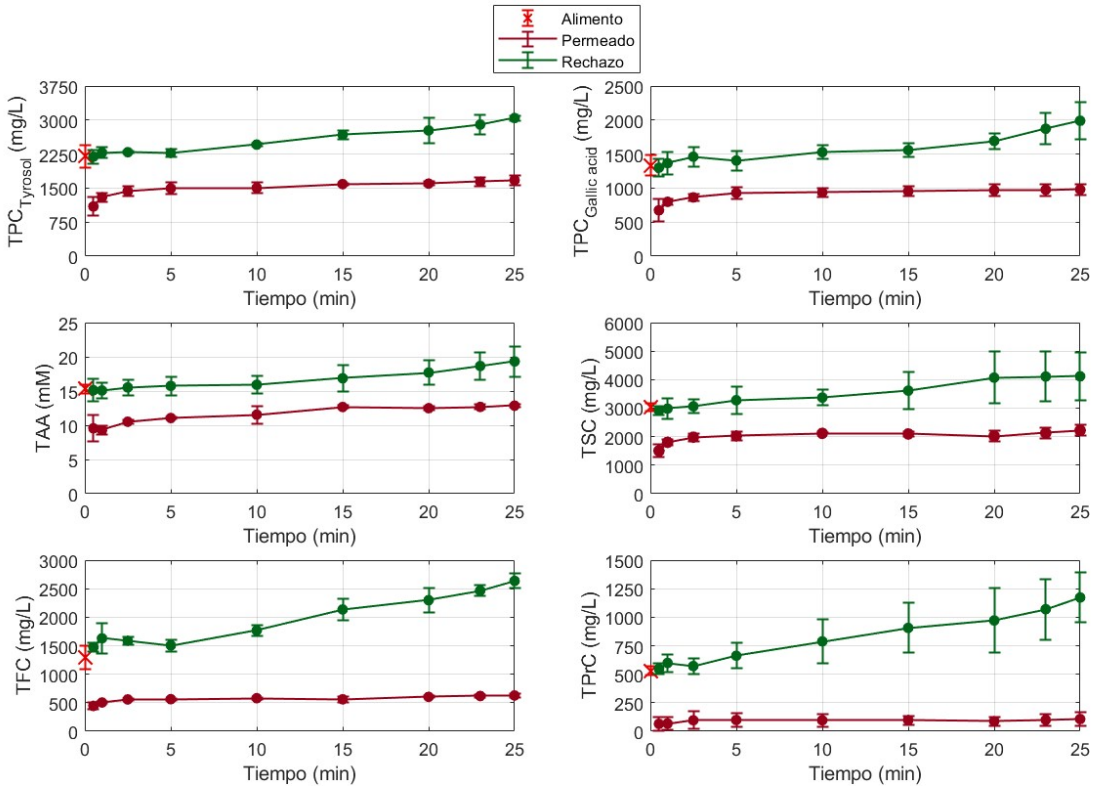



**Figura 2.** Caracterización de las corrientes de alimento (×), permeado (─) y rechazo (─) en la filtración de las lías de vino atendiendo al TPC (Tirosol y Ácido Gálico), TAA, TSC, TFC y TPrC.

En primer lugar, dada la relevancia de los compuestos fenólicos a nivel industrial, es apreciable la elevada concentración de estas especies, tanto en base del Tirosol como del Ácido Gálico, partiendo en valores de 2,250 y 1,300 mg/L, respectivamente. Asimismo, otra familia de polifenoles, los flavonoides, también presentan un elevado contenido inicial, cercano a los 1,300 mg QE/L. Asimismo, la actividad antioxidante total que muestran las lías de vino es elevada, equivalentes a 15 mM de Trolox. Esto justifica el interés de estudiar esta matriz vegetal como fuente de compuestos antioxidantes. No obstante, también hay presencia de otros compuestos que, de inicio, no nos resultan interesantes. Las lías presentan altos contenidos de azúcares, partiendo de 3,000 mg GE/L, y una concentración de proteínas de 600 mg BSAE/L. Estas especies, sin embargo, también tienen una utilidad a nivel industrial, ya que son especies que pueden ser ampliamente utilizadas en sectores como el desarrollo de materiales, cosmética o como aditivos alimentarios.

Por otro lado, el tratamiento de estos residuos mediante una membrana de 15 kDa ofrece la posibilidad de purificar y concentrar estas especies atendiendo a su tamaño molecular o interacciones con la membrana. Se observa que, en la corriente del permeado, la concentración de todas las especies se mantiene constantes, mientras que en la de rechazo se incrementa progresivamente a medida que se reduce el volumen de lías alimentado. Para evaluar la selectividad de estas membranas a las especies estudiadas, se determina su índice de rechazo, cuyo valor promedio se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Índices de rechazo de las membranas a las especies analizadas.

| Análisis | R (%) |
|---|---|
| TPC (Tirosol) | 37.03 |
| TPC (Ácido Gálico) | 36.75 |
| TAA | 28.44 |
| TSC | 37.19 |
| TFC | 66.29 |
| TPrC | 86.24 |

Con estos resultados, implementar una etapa de 15 kDa permite obtener una fracción de rechazo rica en proteínas y flavonoides, debido a los elevados índices de rechazo obtenidos, mientras que purifica estos residuos y se obtiene un permeado con elevadas concentraciones de polifenoles, azúcares y una elevada actividad antioxidante.

**Evaluación de la recuperabilidad de la membrana**

Finalizados los ensayos de filtración de las lías y la aplicación del protocolo de limpieza propuesto, se reevaluó la permeabilidad hidráulica de las membranas en las mismas condiciones de partida, obteniendo unos porcentajes de recuperación promedio para cada membrana estudiada de 88, 93 y 84 %, respectivamente. Estos elevados índices de recuperación, cercanos al 90 %, sugieren una excelente recuperabilidad de estos elementos con una limpieza química. El porcentaje remanente puede deberse a un ensuciamiento irreversible causado por la incrustación de partículas en los poros de la membrana, que no son completamente eliminadas mediante la limpieza química. De igual manera, estos resultados verifican que estos elementos pueden ser reutilizados en diferentes ciclos de filtración, alargando la vida útil de las membranas y abaratando costes de material a largo plazo en un hipotético escalado industrial.

## CONCLUSIONES

En conclusión, la implementación de una etapa de ultrafiltración de 15 kDa permite una separación selectiva eficaz de las fracciones presentes en las lías de vino, favoreciendo la retención de especies de mayor tamaño molecular como proteínas y flavonoides, mientras que en el permeado se concentran compuestos de menor tamaño como polifenoles y azúcares. Este comportamiento evidencia la utilidad de esta etapa como unidad de fraccionamiento dentro del proceso global de valorización. Asimismo, los ensayos realizados muestran una buena reproducibilidad del proceso, con comportamientos consistentes entre experimentos tanto en condiciones de operación como en los perfiles de separación obtenidos. Finalmente, los elevados índices de recuperabilidad de las membranas tras los ciclos de limpieza confirman una adecuada reversibilidad del ensuciamiento y posible reutilización en múltiples ciclos, reforzando la viabilidad operativa y económica de esta etapa en un eventual escalado industrial.

## AGRADECIMIENTOS

Miguel-Jorge Reig-Valor expresa su más sincero agradecimiento por el apoyo recibido a través de la ayuda FPU24/00986, financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN) del Gobierno de España, cuya contribución ha sido fundamental para el desarrollo de su actividad investigadora.

## REFERENCIAS

[1] Maicas, S.; Mateo, J. J. (2020). “Sustainability of Wine Production”. *Sustainability*, v. 12, n. 2, p.p 559. https://doi.org/10.3390/SU12020559

[2] Nazzaro, F.; Fratianni, F.; et al. (2022). “Polyphenols applications in food industry sector”. *Technologies to Recover Polyphenols from AgroFood By-Products and Wastes*, p.p 301–336. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85273-9.00002-8

[3] Rodrigues, F.; Cádiz-Gurrea, M. D. L. L., et al. (2018). “Cosmetics”. *Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications*, p.p 393–427. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813572-3.00012-9

# Fermentación de Caqui para el Desarrollo de un Ingrediente Multifuncional con Beneficios para la Salud Dérmica y Actividad Fotoprotectora

**Guillem Moral, Cristina[(1)], Herraez, Victor[(1)], Blanes, María[(1) (3)], Hernando, Isabel [(4)]**

*(1) G.I. en Eco-procesos, Cosmética y Salud. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España. e-mail: cguillem@aitex.es*

*(2) Departamento de Biotecnología, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia*

*(3) Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Campus de Alcoy, Universitat Politècnica de València*

*(4) Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia*

## RESUMEN

En la búsqueda de alternativas frente a los ingredientes químicos contaminantes, los subproductos agroalimentarios se han convertido en un foco de investigación. El caqui (Diospyros kaki) es ampliamente reconocido por su elevado contenido de biomoléculas funcionales y constituye uno de los subproductos de mayor impacto en la Comunidad Valenciana. En este sentido, tras un proceso de transformación del subproducto de destrío del caqui, mediante procesos de fermentación por microorganismos endófitos, se ha explorado el potencial del subproducto como ingrediente fotoprotector multifuncional. Los resultados obtenidos revelan una mejora del potencial de protección solar, reflejada en el aumento de los índices UVAPF y SPF, así como una acción protectora frente al estrés oxidativo a nivel dérmico y una actividad despigmentante. Estos resultados confieren al ingrediente un perfil diferenciador en la búsqueda de soluciones sostenibles del mercado.

**Palabras clave:** Biotecnología, Cuidado de la piel, Revalorización, Sostenibilidad, Caqui.

## INTRODUCCIÓN

El mercado de los ingredientes químicos se encuentra inmerso en un proceso de transformación orientado a la sustitución de compuestos químicos con elevado impacto ambiental. Entre ellos, los filtros solares se posicionan como uno de los principales focos de preocupación debido a su persistencia y toxicidad ambiental. En un contexto mundial, donde el sol se considera como un factor de riesgo incidente que deriva en el aumento de patologías dérmicas (melanoma, …) el empleo de fotoprotección y por ende de sus filtros, representa un desafío relevante para el sector. En la actualidad entre los filtros más empleados se presentan los filtros orgánicos como el oxybenzone, asociado al deterioro de ecosistemas marinos y alta toxicidad [1]; o los filtros minerales como ZnO y $TiO_2$, que a su vez presentan riesgos ambientales significativos [2]. Ante la limitada disponibilidad de alternativas eficaces, la investigación se ha centrado en la exploración de derivados procedentes de procesos biotecnológicos basados en plantas, algas o microorganismos, si bien estos compuestos no logran reemplazar completamente la funcionalidad de los filtros UV convencionales [3].

En este contexto, los subproductos agroalimentarios emergen como una fuente renovable de interés para el desarrollo de nuevas alternativas sostenibles. El caqui (*Diospyros kaki*), se presenta como una materia prima con alto potencial y consumo en nuestro país, específicamente la Comunidad Valenciana, alcanzando una superficie de 13,970 hectáreas. Este crecimiento productivo conlleva un incremento paralelo en la generación de subproductos, con pérdidas superiores al 40 % en campo [4]. Entre la variedad de subproductos, el caqui astringente se presenta como una fracción significativa de subproducto generado durante el destrío que presenta un alto contenido de moléculas bioactivas y funcionales lo que lo convierte en un foco de creciente interés investigador [5].

La literatura científica respalda el potencial antioxidante y bioactivo del fruto del caqui, especialmente en su estado astringente, en el que se ha descrito un contenido en polifenoles hasta 2.5 veces superior respecto a estados de madurez más avanzados [6]. Entre las principales biomoléculas presentes destacan compuestos fenólicos y flavonoides (quercetina, kaempferol, catequinas), ácidos fenólicos (ácido gálico, ácido ferúlico), taninos (proantocianidinas, flavano-elagitanninos) y carotenoides (β-caroteno, licopeno), ampliamente reconocidos por sus beneficios, incluidos efectos antioxidantes y fotoprotectores [7].

Diversos estudios han evidenciado el impacto positivo de extractos polifenólicos de caqui sobre la salud cutánea. Estos extractos muestran actividad fotoprotectora frente a radiación UV y luz azul, acción despigmentante mediante mecanismos como la inhibición de la enzima tirosinasa [7], así como efectos protectores a nivel dérmico, incluyendo la inhibición de metaloproteasas [8], la prevención de la hiperpigmentación [9] y la protección frente al fotoenvejecimiento [7].

Entre las diferentes técnicas biotecnológicas de revalorización de biomasas vegetales, la fermentación espontánea mediada por la microbiota autóctona presente de forma natural en el sustrato, se ha consolidado como una estrategia eficaz para el desarrollo de bioingredientes funcionales. En particular, el caqui (*Diospyros kaki*), debido a su elevado contenido en compuestos fenólicos, carotenoides y azúcares fermentables, presenta un notable potencial como materia prima para el desarrollo de procesos de fermentación espontánea orientados a la obtención de fermentos con actividad biológica de interés [10].

Partiendo de subproductos de caqui procedentes del proceso de destrío, en el presente trabajo se ha evaluado el potencial del caqui fermentado para actuar como activo con perfil multifuncional con el objetivo de validar su acción como *booster* de protección solar y aportar a su vez, beneficios adicionales en la salud dérmica mediante estudios *in vitro*.

## OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo explorar el potencial de un nuevo ingrediente fermentado procedente de subproductos de destrío del caqui para su incorporación como ingrediente multifuncional con actividad fotoprotectora y beneficios para la salud de la piel.

## RESULTADOS

Primeramente, se procedió al desarrollo del ingrediente mediante fermentación espontánea del fruto entero procedente del destrío (Fermento). Tras esto, se evaluó el

potencial del ingrediente como *booster* de protección solar *in vitro*; así como su actividad dérmica mediante modelos celulares.

**Evaluación SPF**

El potencial del fermento como booster de fotoprotección se evaluó conforme a la norma ISO 24443:2021 determinando la capacidad del ingrediente para incrementar los índices de protección solar al ser incorporado en una formulación patrón acreditada (STD-S2).

Para ello, el fermento se incorporó al 1 % en una crema estándar SPF-14 (STD-S2) (Weneos, Francia), evaluándose los valores de SPF y UVA-PF.

**Tabla 1.** Análisis descriptivo y porcentaje de mejora de SPF y UVA-PF tras la incorporación del fermento (1 %) en una formulación estándar STD-S2 SPF 14.

| | UVAPF | | | | SPF | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Media** | **Mediana** | **SD** | **Mejora UVAPF vs STD-S2 (%)** | **Media** | **Mediana** | **SD** | **Mejora SPF (%) vs STD-S2** |
| Fermento | 17.5 | 17.6 | 0.465 | 28.68 | 16.9 | 17.1 | 0.574 | 34.13 |
| STD-S2 | 13.6 | 13.5 | 0.194 | 0 | 12.6 | 12.7 | 0.337 | 0 |

Como se observa en la Tabla 1, el análisis de los resultados mostró una mejora significativa del 28.68 % en UVA-PF y del 34.13 % en SPF respecto al patrón acreditado (p-valor < 0.001), poniendo de manifiesto el potencial fotoprotector del fermento como *booster,* revelando capacidad para reducir el empleo de filtros solares en formulaciones finales.

**Evaluación dérmica**

Con el objetivo de definir la acción del ingrediente sobre la salud de la piel se emplearon modelos celulares de fibroblastos humanos *(Human dermal neonatal fibroblast*) en estado senescente tras ser sometidos a un estrés químico por peróxido de hidrógeno. Tras 24 horas de contacto con el extracto y un control positivo (ácido ascórbico), se evaluó la viabilidad celular, así como la capacidad antioxidante. Paralelamente se emplearon líneas celulares humanas de melanocitos (hTERT-immortalized Dermal Melanocyte CRL-4059 ™) con el objetivo de determinar la acción de protección del activo frente a la pigmentación.

En primer lugar, el resultado de viabilidad celular mostró como al incorporar el activo al 1 % se observaba una mejora significativa de la actividad mitocondrial del 12 % (p-valor 0.013 %) (Figura 1) reflejando una alta biocompatibilidad frente a los fibroblastos dérmicos.

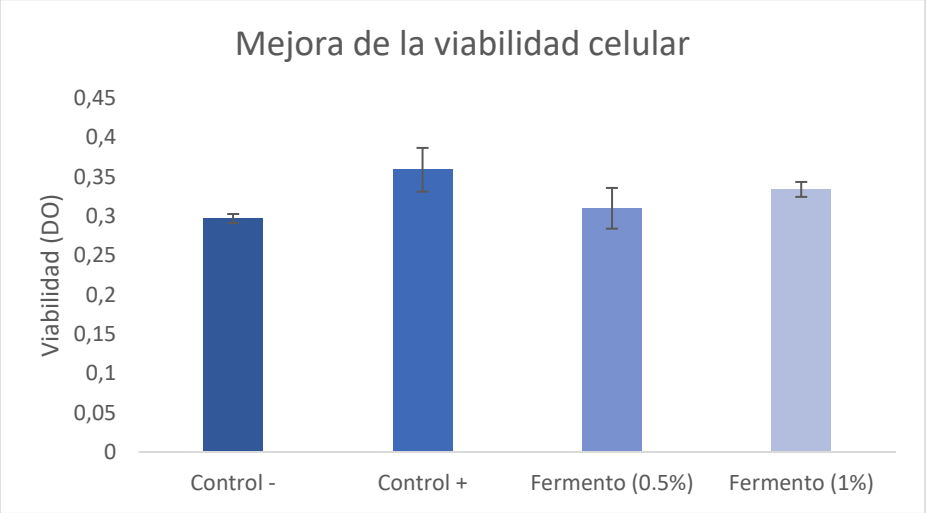



**Figura 1**. Efecto del fermento a diferentes dosis sobre la viabilidad celular de fibroblastos dérmicos humanos en estado senescente.

Posteriormente el sobrenadante celular fue evaluado con el objetivo de cuantificar la liberación de biomoléculas activas con potencial de protección frente al daño oxidativo, expresadas como equivalentes de Trolox, capaces de mitigar el daño inducido por especies reactivas de oxígeno (ROS). Reflejando como, entre otros, las células son capaces de fomentar su supervivencia y mantener la actividad mitocondrial debido a la activación de mecanismos de protección frente a la oxidación obteniéndose una mejora significativa del 82.3 % (p-valor >0.05 %) frente al control negativo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Capacidad antioxidante celular inducida por el fermento, expresada como equivalentes de Trolox.

| | **Media (Trolox eq Mm/Viabili-dad (DO)** | **Mediana (Trolox eq Mm/ Viabilidad DO)** | **SD (Trolox eq Mm/ Viabilidad DO)** | **Mejora (%)** |
|---|---|---|---|---|
| Control - | 60.9 | 59.2 | 34.9 | 0 |
| Ácido ascór-bico | 230 | 224 | 23 | 277.66* |
| Fermento 0.5% | 22.1 | 22.1 | 2.11 | -63.711 |
| Fermento 1% | 111 | 111 | 9.34 | 82.266* |

Atendiendo a los resultados se procedió a la evaluación de la acción despigmentante del fermento a la dosis más efectiva en experimentos anteriores (1 %) empleando ácido kójico (700 µM) como control positivo. Los resultados evidenciaron como el activo es capaz de disminuir la síntesis de melanina frente a un control sin tratar (control -) en un 24.48 % (p-valor<0.01%) (Tabla 3).

**Tabla 3**. Inhibición de la síntesis de melanina inducida por el fermento (1 %)

| | Media (Melanina/ proteínas totales (µg/mL)) | Mediana (Melanina/ proteínas totales (µg/mL)) | SD (Melanina/ proteínas totales (µg/mL)) | Mejora (%) |
|---|---|---|---|---|
| C- | 125 | 125 | 4.3 | |
| Fermento 1% | 94.4 | 94.4 | 6.87 | 24.48* |
| C + (ácido kojico (700 um)) | 102 | 99.6 | 8.96 | 18.4* |

## CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que el proceso de transformación aplicado al subproducto de caqui ha dado lugar a un ingrediente activo con un perfil diferencial, destacando tanto por su potencial fotoprotector como por su eficacia dérmica. La evaluación del ingrediente como *booster* de protección solar ha demostrado una acción barrera frente a la radiación solar, reflejada en el incremento significativo de los índices SPF y UVA-PF al ser incorporado en una formulación estándar de referencia.

De manera complementaria, los estudios in vitro han permitido demostrar que el ingrediente desarrollado es capaz de modulares mecanismos celulares de protección frente al estrés oxidativo, promoviendo la síntesis de biomoléculas antioxidantes y favoreciendo un aumento de la proliferación en fibroblastos humanos. Esto posiciona al ingrediente como un candidato de interés para el desarrollo de productos dermatológicos orientados a la protección y regeneración cutánea. Asimismo, se ha evidenciado su potencial despigmentante en melanocitos humanos, mostrando una reducción significativa de la síntesis de melanina, coherente con las rutas de acción descritas en la literatura, como la inhibición de la enzima tirosinasa, para su empleo en matrices que aleguen reivindicaciones tales como la uniformidad del tono.

En conjunto, estos hallazgos permiten definir al fermento de caqui como un ingrediente multifuncional, con capacidad para actuar como alternativa o complemento a los filtros solares convencionales, aportando adicionalmente beneficios antioxidantes, regeneradores y despigmentantes, lo que lo consolida como una solución prometedora y sostenible para la formulación de productos biotecnológicos de nueva generación.

## AGRADECIMIENTOS

*Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "OMIPERBIO: Ingredientes Ómicos Personalizados para la Mejora del Microbioma, Salud y Calidad Alimentaria desde una Visión Multisectorial" que está financiado por el CDTI (Centro para el desarrollo tecnológico Industrial), a través del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en las ayudas destinadas a Centros Tecnológicos de Excelencia «Cervera» en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2024-2027. CER-20251006*

## REFERENCIAS


[1] Galanakis, C. M. (2018). Food waste recovery: Processing technologies, industrial techniques, and applications. Academic Press. Lugar de publicación: Chennai, India. Editado por: Charis M. Galanakis.

[2] Sánchez-Quiles, D., & Tovar-Sánchez, A. (2015). "Sunscreens as a source of hydrogen peroxide production in coastal waters". *Environmental Science & Technology*. v. 49, n. 1, p.p. 331–336. https://doi.org/10.1021/es5020696

[3] Milutinov, J., et al. (2024). "The potential of natural compounds in UV protection products". *Molecules*. v. 29, n.22. https://doi.org/10.3390/molecules29225409

[4] Fernandez-Zamudio, M. A., Barco, H., & Schneider, F. (2023). Direct measurement of mass and economic persimmon losses in Spain. EU Food Loss and Waste Prevention Hub, European Commission.

[5] Hoang, H. T., Moon, J. Y., Lee, Y. C. (2021). "Natural antioxidants from plant extracts in skincare: A review". *Cosmetics*. v. 8, n.4. https://doi.org/10.3390/cosmetics8040106

[6] Sawabe, A., Ohnishi, N., Yoshioka, S., Kusudo, K., Kanno, K., Watanabe, Y. (2021). "Functional Ingredients and Food Preservative in Immature Persimmon "Tekka-Kaki"." *Processes*. v. 9, n.11. https://doi.org/10.3390/pr9111989

[7] Kashif, M., Akhtar, N. Mustafa, R. (2017). "An overview of dermatological and cosmeceutical benefits of Diospyros kaki and its phytoconstituents". *Revista Brasileira de Farmacognosia*. v. 27, p.p. 650–662. https://doi.org/10.1016/j.bjp.2017.06.004

[8] An, B.-J., Kwak, J.-H., Park, J.-M., Lee, J.-Y., Park, T.-S., Lee, J.-T., Son, J.-H., Jo, C., Byun, M.-W. (2005). "Inhibition of enzyme activities and the antiwrinkle effect of polyphenol isolated from the persimmon leaf (Diospyros kaki folium) on human skin". *Dermatologic Surgery*. v. 31, n. 7, p.p. 848–855. https://doi.org/10.1111/j.1524-4725.2005.31730

[9] Ohguchi, K., Nakajima, C., Oyama, M., Iinuma, M., Itoh, T., Akao, Y., Nozawa, Y., Ito, M. (2010). "Inhibitory effects of flavonoid glycosides isolated from the peel of Japanese persimmon (Diospyros kaki 'Fuyu') on melanin biosynthesis". *Biological & Pharmaceutical Bulletin*. v. 33, p.p. 122–124. https://doi.org/10.1248/bpb.33.122

[10] Cairone, F., Angiolella, L., Bertini, F., Iazzetti, A., Fabrizi, G., Petralito, S., Cesa, S., Simonetti, G. (2025). "Ripening-related changes in color and bioactive compounds of Diospyros kaki: Preliminary insights on its antifungal activity". *Foods*. v. 14, n. 1332. https://doi.org/10.3390/foods14081332

# Aplicación del neuromarketing en el lanzamiento y promoción de videojuegos: caso de estudio de “Interactive design 2M.J.N.”

**Juárez-Varón, David(1), Ospina Ochoa, Marlon Jared(2), Henao Galindo, Shirley Andrea(3), Gaviria, María José(4)**

*(1) Universitat Politècnica de València (España), djuarez@upv.es*
*(2) Universitat Politècnica de València (España), jaredospina2013@gmail.com*
*(3) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), shirley.henao02@usa.edu.es*
*(4) Universidad Eafit (Colombia), mgavir20@eafit.edu.co*

## RESUMEN

El presente Trabajo Final de Máster analiza la aplicación de técnicas de neuromarketing en la empresa emergente “Interactive Design 2M.J.N.”, dedicada al desarrollo de productos digitales en el ámbito del entretenimiento y la industria de los videojuegos. La investigación se centra en la evaluación del lanzamiento de un videojuego de la compañía, con especial énfasis en el análisis de la interacción de los usuarios con el tráiler promocional y con los contenidos digitales difundidos a través de redes sociales, incluyendo materiales formativos relacionados con el diseño y el desarrollo de videojuegos.

Durante la fase de planificación del proyecto se consideró la incorporación de personajes impresos en 3D como parte de la estrategia promocional. Sin embargo, dicha propuesta no fue implementada debido a limitaciones de tiempo y recursos económicos. A pesar de ello, el estudio contempla la impresión 3D como una posible línea de desarrollo futuro dentro de la estrategia de marketing de la empresa, tomando como referencia experiencias exitosas previamente documentadas en el sector, como el caso de Raccoon Games Studio.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon herramientas propias del neuromarketing, entre ellas la codificación facial y el eye tracking, con el objetivo de analizar la experiencia de usuario y optimizar las estrategias de comunicación y marketing digital. La aplicación de estas técnicas permitió obtener información relevante para mejorar el posicionamiento de la empresa en el mercado y fortalecer la relación entre el usuario, el producto y la marca.

**Palabras clave:** Neuromarketing, Videojuegos, Interacción de Usuarios, Eye Tracking, Codificación Facial, Impresión 3D, Marketing Digital, Experiencia de Usuario, “Interactive Design 2M.J.N.”.

## INTRODUCCIÓN

El lanzamiento y posicionamiento de productos dentro del mercado actual del entretenimiento digital exige la adopción de enfoques interactivos en un ecosistema de comunicación en constante cambio [1]. El neuromarketing surge en este escenario como una disciplina integradora que unifica el marketing, la psicología y la neurociencia con el objetivo de analizar los procesos emocionales y cognitivos no conscientes que rigen la toma de decisiones de los usuarios. Frente a los métodos tradicionales de investigación de mercados, este enfoque permite recabar datos objetivos y científicos

sobre la atención y la reactividad de los consumidores ante estímulos digitales controlados.

**Experiencia de usuario y diseño de interfaces en el entorno interactivo**

En este contexto, la experiencia de usuario (UX) se constituye como el conjunto de sensaciones, percepciones y respuestas psicofisiológicas derivadas de la interacción directa con un activo digital, evaluando la fluidez de navegación, la claridad narrativa y la carga cognitiva implicada. Por su parte, el diseño de interfaces (UI) rige la organización funcional y gráfica del entorno (tipografía, color y jerarquía visual), operando con la finalidad de mitigar la fricción interactiva y maximizar la usabilidad general del sistema. Para potenciar el impacto de una marca de videojuegos, el contenido debe estructurarse bajo estrategias sólidas de *branded content* que articulen el tráiler promocional y la plataforma web como herramientas de tracción emocional efectivas [2, 3].

**Herramientas biométricas y marketing experiencial**

La evaluación empírica de estos estímulos multimedia se ejecuta mediante la combinación de biometrías avanzadas. El seguimiento ocular (*eye tracking*) registra los recorridos perceptivos y puntos de fijación dentro de áreas de interés específicas (AOI), identificando la eficacia distributiva de los elementos visuales. De forma paralela, la codificación facial (*face coding*) automatiza la lectura de microexpresiones involuntarias para tipificar emociones primarias (sorpresa, interés, miedo o rechazo) ante narrativas audiovisuales.

Estas técnicas, integradas en una estrategia global de comunicación digital y marketing de atracción o *inbound marketing*, resultan críticas para robustecer la arquitectura de la información web y optimizar la visibilidad en motores de búsqueda [4]. Asimismo, recursos vanguardistas como la impresión 3D se perfilan teóricamente como herramientas de marketing experiencial capaces de materializar físicamente la identidad tridimensional de los personajes, reforzando el vínculo afectivo de la comunidad de usuarios de acuerdo con los términos formales de fidelización de la marca [5].

**Metodología de la investigación**

La investigación se fundamenta en un diseño experimental descriptivo mixto con triangulación metodológica, centrado en el análisis de los entornos digitales de la empresa emergente *Interactive Design 2M.J.N.*. El protocolo operativo se articuló a través de tres líneas de acción consecutivas: la producción técnica y edición de un video tráiler promocional mediante herramientas de postproducción audiovisual (*Adobe After Effects*), la programación y optimización de una plataforma web corporativa (*WordPress* y *HTML/CSS/JavaScript*), y la difusión de contenidos interactivos formativos en redes sociales.

El levantamiento de datos se completó mediante pruebas con usuarios en un entorno controlado donde se capturaron de forma síncrona los patrones oculares y las respuestas de expresión facial de los participantes ante los estímulos interactivos desarrollados. El protocolo concluyó con la monitorización de la analítica de tráfico web y la aplicación de cuestionarios estructurados, permitiendo contrastar de manera directa los registros fisiológicos objetivos con las valoraciones declarativas de los participantes.

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es evaluar la eficacia del lanzamiento, la promoción y la estrategia de comunicación digital de la empresa emergente de videojuegos "Interactive Design 2M.J.N." mediante la aplicación combinada de técnicas de neuromarketing y métricas de experiencia de usuario (UX/UI).

Para dar cumplimiento a este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

Monitorear, mediante el uso de *eye tracking*, los patrones de atención visual, los recorridos y las áreas de interés (AOI) de los usuarios durante el visionado del tráiler promocional y la navegación web corporativa.

Identificar y catalogar las respuestas emocionales y el nivel de implicación (*engagement*) de los consumidores frente a los estímulos audiovisuales de la marca a través de sistemas de codificación facial.

Analizar la usabilidad, el rendimiento técnico y la efectividad del posicionamiento SEO de la interfaz web, contrastando las métricas de tráfico y navegación con la percepción declarada de los usuarios.

Contextualizar el potencial teórico de la impresión 3D como un recurso de marketing experiencial orientado a fortalecer la conexión afectiva de la comunidad con los personajes y la identidad del videojuego.

## RESULTADOS

### Análisis del tráiler promocional (UX/UI y Neuromarketing)

El análisis demográfico reveló una segmentación bimodal (33,3% de usuarios entre 18-25 años; 38,9% mayores de 45 años), lo que exige un diseño visual equilibrado para distintas capacidades de procesamiento cognitivo. Existe una alta asociación de marca previa en la muestra (100% reconoce a Nintendo y 55,6% a Epic Games), fijando altas expectativas de calidad estética.

En cuanto a la atención y calidad visual, el 68% de los usuarios reportó un alto interés inicial captado en los críticos primeros 8 segundos; sin embargo, un 22% experimentó un aumento de la carga cognitiva debido a la velocidad de fotogramas y al exceso de desenfoque. A nivel emocional, el 78% destacó el impacto positivo de la música y las animaciones, elementos clave que el 82% consideró determinantes para su intención final de probar el videojuego.

El análisis biométrico escena por escena confirmó estos datos declarativos: el plano de apertura generó una alta activación emocional (sorpresa y temor), capturando la atención de forma efectiva. Por el contrario, la segunda escena provocó confusión y críticas, evidenciando problemas de usabilidad narrativa. Finalmente, la escena del clímax obtuvo el mayor nivel de *engagement*, aunque con una valencia emocional más neutral, sugiriendo la necesidad de reforzar el cierre de la pieza audiovisual.

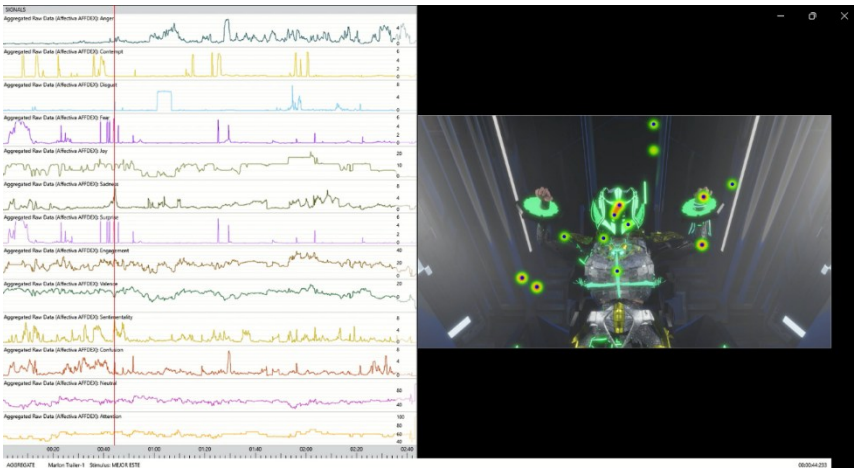


**Figura 1**. Distribución de las emociones generadas en los usuarios durante la primera escena del tráiler experimental. Fuente: Elaborado por los autores.

### Análisis de la plataforma web corporativa

Respecto a la arquitectura de la información, el 71% de los participantes encontró la interfaz intuitiva y fácil de navegar. El apartado de tutoriales fue utilizado por un 59% de la muestra con resultados positivos de aprendizaje, aunque un 15% reportó fricción por exceso de duración, sugiriendo la necesidad de transitar hacia modelos de microaprendizaje asistido. Globalmente, la satisfacción fue alta, con una tasa de intención de recomendación (NPS) del 68%.

El registro combinado de codificación facial y atención visual durante la interacción web permitió identificar cuatro focos de alto rendimiento:

El modelo 3D animado: Situado en la home, acaparó el mayor impacto inicial, demostrando ser el ancla visual más efectiva.

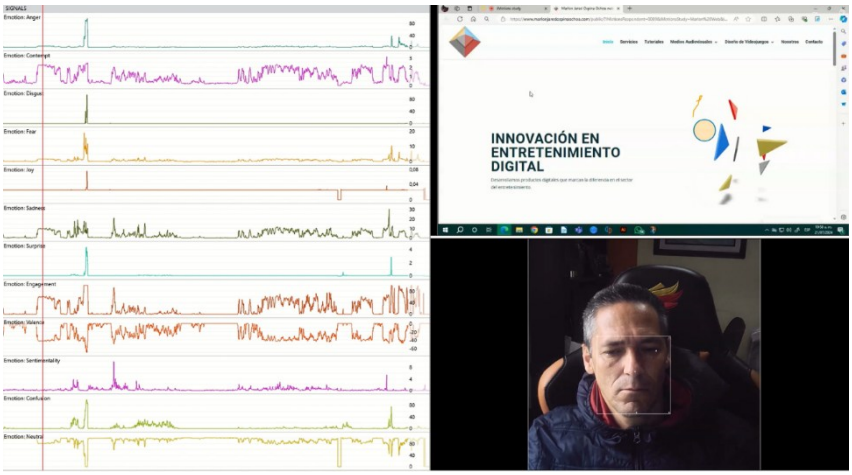



**Figura 2**. Visualización de las emociones registradas en los usuarios a través de codificación facial durante la interacción con el modelo 3D animado. Fuente: Elaborado por los autores.

Sección de "Producción de Contenidos": Retuvo la atención sostenida por más tiempo, validándose como el servicio de mayor interés para el target.

El Call to Action (CTA): El mensaje de invitación hacia los tutoriales registró altos niveles de sensibilidad y contemplación, funcionando como un disparador de conversión eficaz. El apartado de tutoriales: Generó las mayores respuestas de sorpresa positiva e involucramiento cognitivo (engagement).

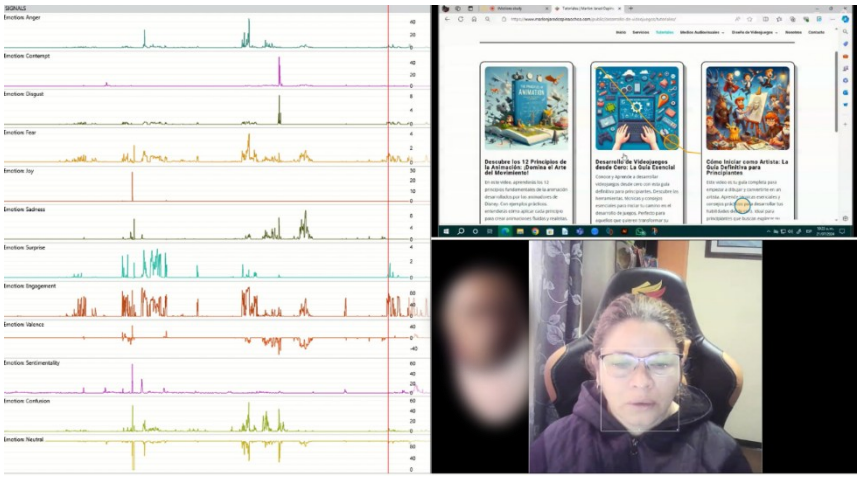


Figura 32. Registro de las emociones generadas en los usuarios durante la interacción con el apartado de tutoriales de la página web. Fuente: Elaborado por los autores.

## CONCLUSIONES

Los resultados del estudio evidencian la necesidad de optimizar técnicamente el tráiler promocional reduciendo la fricción cognitiva asociada al exceso de desenfoque y a la iluminación, lo que garantizará una usabilidad emocional más accesible y menos agotadora. Asimismo, se confirma que el diseño emocional —sustentado en la sincronía de la música y las animaciones— actúa como el principal motor de retención visual y conversión de espectadores en jugadores. En el entorno web, aunque la arquitectura de la información actual resulta intuitiva, la aplicación de técnicas de Card Sorting y la edición hacia modelos de microaprendizaje en los tutoriales permitirán perfeccionar la navegación contextual y minimizar la carga mental del usuario.

A nivel metodológico, la triangulación de herramientas biométricas avanzadas (como iMotions) con métricas declarativas tradicionales y de recomendación (NPS) se consolida como un modelo de investigación altamente fiable. Este enfoque permite evaluar de forma objetiva los activos promocionales de "Interactive Design 2M.J.N.", facilitando un rediseño continuo basado en evidencias psicofisiológicas reales y no solo en suposiciones de diseño.

Como líneas futuras de investigación y desarrollo estratégico, se propone extender la evaluación neurocientífica al propio entorno de juego (in-game) e incorporar estudios multiculturales, permitiendo adaptar la usabilidad, la narrativa y la dificultad a diferentes perfiles demográficos globales. En el ámbito del marketing experiencial, resulta prioritario explorar la impresión 3D con materiales avanzados y opciones de personalización en tiempo real para materializar el vínculo afectivo entre el jugador y la marca. Finalmente, para maximizar la competitividad en la industria, se sugiere la integración de mecánicas de gamificación en redes sociales, el uso de prototipado iterativo con feedback continuo de la comunidad, y la incursión en canales

promocionales inmersivos (AR/VR) respaldados por estrategias auténticas de colaboración con creadores de contenido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Pino, C., Castelló, A., & Ramos-Soler, I. (2013). La comunicación en cambio constante. Madrid: Fragua.

[2] Comisión de Branded Content de IAB Spain. (2015). Infografía Branded Content.

[3] Horrigan, David (2009). "Branded content: A new model for driving tourism via film and branding strategies". Tourismos, v. 4, n. 3, p.p. 51-65.

[4] Patrutiu-Baltes, Loredana (2016). "Inbound marketing-the most important digital marketing strategy". Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Economic Sciences. Series V, v. 9, n. 2, p.p. 61.

[5] Real Academia Española. Diccionario de la lengua española (23.ª ed., versión 23.7 en línea). https://dle.rae.es

# Descarga de tareas en Aplicaciones AIoT.

**Zafrilla-Muñoz, Jorge, Silvestre-Blanes, Javier, Albero-Albero, Teresa**
*Departamento de Informática y Computadores (DISCA) Instituto Tecnológico de Informática (ITI). Universitat Politècnica de València (UPV) {jorzafmu,jsilves,talbero}@disca.upv.es*

## RESUMEN

En los últimos años se ha dado un aumento exponencial de dispositivos conectados debido a diferentes razones (IIoT: Industrial Internet of Things). La explosión en el uso de la Inteligencia Artificial ha generado el concepto denominado AIoT (Artificial Intelligence of Things). En estas aplicaciones, la descarga de tareas gestiona la transferencia de la carga de procesamiento desde dispositivo finales, muy cerca del proceso y de baja capacidad, a otros dispositivos más potentes en el borde o en la nube. La evolución de las redes de comunicaciones y la reducción en las latencias ha sido una tecnología habilitadora en este ámbito. Es una tarea fundamental en la industria 4.0 y en la emergente 5.0, puesto que permite superar los límites de inteligencia de los dispositivos, reducir la latencia y mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad. Este artículo constituye un primer paso hacia la caracterización integral de arquitecturas AIoT distribuidas en entornos industriales reales, realizándose una evaluación preliminar del uso de técnicas de offloading en aplicaciones de Industrial AIoT

**Palabras clave:** offloading, egde computing, AIoT.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El aumento exponencial en el número de dispositivos conectados en la industria se debe a la convergencia de varios avances tecnológicos junto a necesidades operativas de la industria. Por un lado, la reducción drástica de los costes de los sensores, así como las mejoras en su funcionamiento y eficiencia energética ha facilitado que los fabricantes adopten la tecnología IoT a gran escala. La reducción en tamaño de la electrónica y el desarrollo de nuevos microcontroladores han permitido integrar capacidad de procesamiento en espacios muy reducidos, dotando de esta capacidad en muchas ocasiones a los dispositivos finales. Las mejoras en conectividad han permitido la conexión simultánea de grandes cantidades de dispositivos con una mayor capacidad y menor latencia. Esto ha conducido al auge de la computación en la nube, donde las empresas pueden almacenar y procesar grandes cantidades da datos sin tener que gestionar la infraestructura. Por otro lado, las empresas necesitan optimizar operaciones, reducir costos y minimizar tiempos de inactividad. En definitiva, necesitan lograr una automatización inteligente, donde la IA (*Artificial Intelligence*) transforma los equipos industriales en sistemas capaces de aprender y tomar decisiones de forma autónoma con mínima intervención humana. Esta combinación de tecnologías en el ámbito industrial ha dado lugar al concepto denominado Industrial AIoT (*Industrial Artificial Intelligence of Things*) [1]

A pesar del enorme aumento en capacidad de computación de dispositivos móviles, para tareas de AI como las mencionadas, estos presentan importantes limitaciones, puesto que estas funciones se ejecutan de forma mucho más eficiente sobre coprocesadores especializados como las NPU (Neural Processing Unit) TPU (Tensor Processing Unit) o GPU (Graphics Processing Units) al estar más adaptadas para

optimizar cálculos matriciales, un procesamiento paralelo masivo y una mayor eficiencia entre el flujo de datos y memoria. Por otro lado, se plantean escenarios donde el número de nodos es muy elevado, por lo que los costes han de limitarse de forma que el consumo energético y la capacidad computacional de estos nodos (tengan que ejecutar algoritmos de IA o no) es muy limitada [2]. Esto implica que la carga computacional, en muchos casos no pueda ser ejecutada en el nodo, y se haya de descargar (offloading) la tarea a otros nodos de mayor capacidad de procesamiento (edge o fog computing).

El objetivo de este paper es hacer una evaluación preliminar de las ventajas e inconvenientes que el offloading puede ofrecer en aplicaciones de Industrial AIoT. En estas aplicaciones tenemos un número determinado de sensores de bajo consumo, S ($s_1$, $s_2$,… $s_n$) con capacidad de procesamiento reducida, el concepto denominado computación en el borde o edge computing (los sensores tipo cámara con su procesador PE representadas a la izquierda de la Fig.1). Tradicionalmente, y antes de dotarles de algo de capacidad de procesamiento, los sensores no procesaban la información y esta era transmitida y procesada en la nube (Cloud Computing). Una alternativa es la denominada Fog Computing, donde existen nodos de mayor capacidad de procesamiento (procesador PF en el centro de la Fig. 1 con coprocesadores para IA) conectado por redes de menor latencia con los sensores. Tenemos por tanto N tareas ($t_1$,$t_2$, ...$t_n$), que tienen un coste computacional C ($c_1$, $c_2$, ... $c_n$). La descarga de esas tareas implica la transmisión de B bytes ($b_1$,$b_2$,...$b_n$) al nodo PF, a través de una red con un ancho de banda AB y un deadline máximo de D ($d_1$, $d_2$, …. $d_n$). Los procesadores de los sensores tienen una capacidad computacional de $P_{PE}$ ($P_{PE}$: $P_{PE1}$=$P_{PE2}$=….$P_{PEn}$), mientras que el procesador PF tiene una capacidad computacional de $P_{PF}$. En esta propuesta se añade una etapa de filtrado en el sensor para reducir la transmisión de información al PF y que reduce la necesidad de procesar todos los frames y por tanto la carga en el nodo PF [3]. Se descompone así la carga en un fltrado ($c_f$), de forma que sólo se ejecute la inferencia ($c_{inf}$) en aquellas imágenes que superan el filtrado ($\alpha_i$=1). De forma que $c_i$=$c_f$ + $\alpha_i$ x $c_{inf}$. En este caso tenemos que $c_f$ < PE (El sensor si tiene capacidad de proceso para el fitlrado), mientras que $P_{PEi}$ < $c_{inf}$ < PF, es decir, la inferencia sólo se puede hacer en el Fog. El tiempo de procesado en el sensor i de cada imagen que no haya sido filtrada, es decir, cuando $\alpha_i$=1:

$$d_i < TP_i = T_f + T_{envio} + T_{proceso}$$

Es decir, el deadline habrá de ser menor que la suma del tiempo de filtrado ($T_f$ ), el tiempo de envió ($T_{envio}$) y el tiempo de proceso en el Fog ($T_{proceso}$).

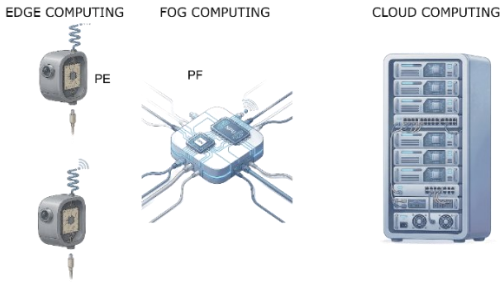



**Figura 1.** Arquitectura de niveles en una aplicación AIoT.

## RESULTADOS

Para la evaluación del esquema propuesto se ha escogido un escenario de 4 nodos con cámara. La tarea para realizar es la detección de personas en un entorno industrial. Esta

tarea puede ser ejecutada por algoritmos de IA de una forma eficiente y con mejores resultados que a través de un desarrollo ad hoc mediante visión artificial clásica. Sin embargo, presenta el inconveniente de que, aunque existan modelos eficientes de IA para dispositivos de baja potencia, su carga de trabajo sea muy superior a la disponible en los nodos PE ( $C>>P_{PE}$). Se puede plantear la descarga de todas las imágenes capturadas al nodo del PF, pero esto implica elevados requerimientos de red, podría saturar al equipo PF y hacer que sea necesario un equipo de gran capacidad, limitando además la escalabilidad de la solución. Por tanto, la tarea de detectar personas($c_i$) se divide en la tarea de filtrar las imágenes sobre las que es conveniente realizar la búsqueda de personas ($c_f$), y por tanto hay que enviar la imagen al nodo PF para su detección ($C_{inf}$). En el sensor se ha utilizado una Raspberry Pi 3, y en el nodo borde una Raspberry Pi 5 con coprocesador de AI HAILO 8 de 26 TOPs. Los modelos utilizados han sido: Yolov5, considerado un estándar industrial por su estabilidad y facilidad de uso con PyTorch; Yolov8 que destacó por una arquitectura de cuadros de referencia más flexible y precisa; Yolov11, que alcanza una mayor precisión con menos parámetros y mayor eficiencia computacional. De cada uno de estos modelos se desarrollaron modelos nano (n), small (s), medium (m), large (l) y extralarge (x). En la **Tabla *1*** se pueden ver los millones de parámetros de cada modelo y los GFLOPS que implican de carga computacional. En esta misma tabla se muestra la precisión de cada modelo en la detección de personas con las fuentes de datos usadas. La métrica **mAP50** considera un verdadero positivo si la clase es correcta y además el IoU (*Intersección sobre Unión*) entre el cuadro determinado y el real es igual o superior al 50%. Esta métrica aporta más calidad a la evaluación al considerar no sólo la clasificación sino también la precisión en la localización del objeto. En este campo más usada aún es la métrica **mAP50-95**, que es el promedio de las métricas mAPx calculadas en 10 umbrales de IoU, desde 50% al 95%. Esta métrica evalúa si el método es bueno encontrando y ajustando el cuadro a los bordes de éste, por lo que requiere que el modelo sea preciso tanto en casos fáciles como en los casos más exigentes, lo que es relevante en aplicaciones industriales por seguridad.

Analizadas las métricas de precisión, se determina que los modelos n y s aportan una calidad suficiente a la detección, por lo que se ha evaluado el tiempo de inferencia en una Raspberry Pi 5 con Hailo. Esto implica la adaptación de las imágenes de entrada al formato usado por Hailo, lo que distorsiona ligeramente las imágenes al tener que transformar las imágenes de 640x480 a imágenes de 640x640. Los tiempos obtenidos se pueden ver en la Tabla 2. Como se puede apreciar con los modelos yolov5 y yolov8 se pueden obtener inferencias en menos de 15 mseg, mientras que con el yolov11 los tiempos van de 15 a 22 mseg, pero la precisión mAP50-95 sube en 0.05 llegando a los 0.887. En la **Tabla 2** también se muestran los resultados de la precisión y los mismos resultados ejecutados sobre Hailo8. Como se puede apreciar se da un esperado decremento de la fiabilidad. Esto es debido principalmente al cambiar la precisión de coma flotante de 32 bits a una precisión de enteros de 8 bits, lo que produce un ruido de cuantización.

El valor de $T_f$, en el sistema real se compone del tiempo de carga y preproceso, que incluye la lectura de la imagen, la codificación y el filtrado de la detección de movimiento. El tiempo de envío ($T_{envio}$) es el tiempo empleado en transmisión, el reensamblaje de los mensajes UDP que forman la imagen, además del tiempo de espera en la cola interna. El tiempo de proceso de la imagen en el Hailo incluye el tiempo de preproceso (redimensionamiento a 640x640 y conversión BGR a RGB ejecutado en procesador ARM) más el tiempo de inferencia ejecutado en el coprocesador HAILO más el tiempo de postproceso, para extraer la información de salida del coprocesador y filtrado de resultados.

**Tabla 1.** Características de los modelos de YOLO 5, 8 y 11.

| Modelo | Parámetros (M) | FLOPs(B)[1] | mAP50[2] | MAP50-95[2] |
|---|---|---|---|---|
| YOLO11n | 2.6 | 6.5 | 0,8827 | 0,7418 |
| YOLO11s | 9.4 | 21.5 | 0.9419 | 0.8872 |
| YOLO11m | 20.1 | 68.0 | 0.9763 | 0.8872 |
| YOLO11l | 25.3 | 86.9 | 1.0000 | 0.9634 |
| YOLO8n | 3.2 | 8.7 | 0.9337 | 0.7905 |
| YOLO8s | 12.2 | 28.6 | 0.9397 | 0.8295 |
| YOLO8m | 25.9 | 78.9 | 0.9609 | 0.8728 |
| YOLO8l | 43.7 | 165.2 | 0.9632 | 0.8799 |
| YOLO5n | 2.6 | 7.7 | 0.8246 | 0.6725 |
| YOLO5s | 9.1 | 24.0 | 0.9439 | 0.8179 |
| YOLO5m | 25.1 | 64.2 | 0.9697 | 0.8733 |
| YOLO5l | 53.2 | 135.0 | 0.9666 | 0.8798 |

**Tabla 2** Características de los modelos de YOLO 5, 8 y 11.

| Modelo | mAP50[2] | MAP50-95[2] | mAP50[3] | MAP50-95[3] | $T_{INFERENCIA}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| YOLO11n | 0,8827 | 0,7418 | 0.8017 | 0.6555 | 15.99 |
| YOLO11s | 0.9419 | 0.8872 | 0.8505 | 0.7086 | 21.30 |
| YOLO8n | 0.9337 | 0.7905 | 0.6925 | 0.5673 | 9.61 |
| YOLO8s | 0.9397 | 0.8295 | 0.8414 | 0.70 | 11.55 |
| YOLO5s | 0.9439 | 0.8179 | 0.8846 | 0.6661 | 12.50 |

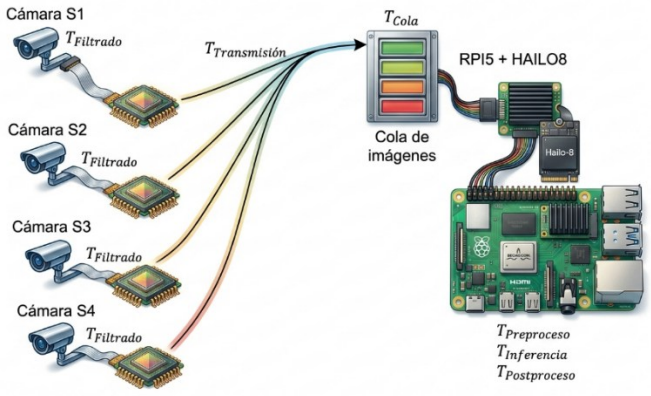



***Figura 1.*** *Arquitectura del sistema*

[1] Detección con COCO dataset y 80 clases pre-entrenadas

[2] Calculado con las fuentes de imágenes propias

[3] Calculado con las fuentes de imágenes propias y sobre Hailo8

**Tabla 3** Tiempos Promedio

| Modelo | Tcarga | Tcola | Tproceso | Ttotal | % inferencia/total |
|---|---|---|---|---|---|
| YOLO11n | 18,39 | 3,805 | 17,496 | 39,682 | 38,04% |
| YOLO11s | 15,07 | 3,807 | 24,461 | 43,357 | 51,12% |
| YOLO8n | 14,68 | 3,808 | 13,392 | 31,891 | 34,17% |
| YOLO8s | 14,89 | 3,805 | 15,211 | 33,914 | 37,86% |
| YOLO5s | 15,89 | 3,813 | 17,553 | 37,250 | 38,99% |

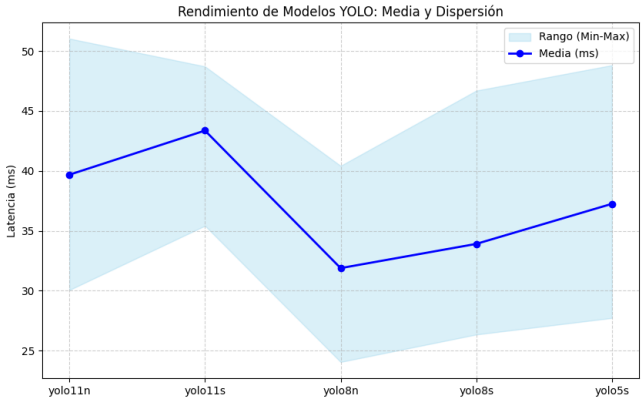



***Figura 2** TP promedio*

**Tabla 4** Prestaciones

| | | | | IoU=0.5 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | mAP50 | mAP50-95 | Nº Det | TP | FP | FN |
| YOLO11n | 0,801 | 0,655 | 491 | 487 | 4 | 117 |
| YOLO11s | 0,858 | 0,708 | 528 | 514 | 14 | 90 |
| YOLO8n | 0,602 | 0,567 | 421 | 421 | 3 | 186 |
| YOLO8s | 0,841 | 0,703 | 519 | 519 | 6 | 91 |
| YOLO5s | 0,824 | 0,626 | 629 | 629 | 123 | 98 |

Cómo se puede ver en la Tabla 3, la inferencia no es el mayor cuello de botella, si no que el tiempo de preprocesado, filtrado y transmisión pueden pesar tanto o más que la inferencia. Hay que resaltar que el tiempo de captura de las fuentes era de 8 imágenes por segundo, lo que no ha dado lugar a tiempos en cola destacables. Sin embargo, tanto aumentando este valor como el número de fuentes, así como el tamaño de imagen puede dar lugar a que el tiempo en cola aumente significativamente. También resaltar que la red usada ha sido Fast-Ethernet, pero en otros entornos inalámbricos, aspecto muy habitual por otra parte en el entorno IIoT, puede incrementar estos tiempos significativamente, especialmente si son necesarias la retransmisión de paquetes.

En cuanto a las prestaciones las métricas estándar en este campo nos indican un buen comportamiento de todos los modelos (mAP50> 0,8 y mAP50-95> 0,6), aunque hay que destacar que existe un número elevado de falsos negativos que podría ser no aceptable en entornos industriales de riesgo. Esto implica que, aunque el equipamiento usado

como PF es potente y puede ejecutar tareas de IA con resultados destacables, podría ser necesaria una jerarquía mayor que implique que algunas imágenes sean ejecutadas en nodos aún más potentes (no necesariamente en el cloud, pero si en otros equipos en el Fog, aunque tengan un coste 10x comparado con el usado.

## CONCLUSIONES

Este trabajo constituye un primer paso hacia la caracterización integral de arquitecturas AIoT distribuidas en entornos industriales reales, realizándose una evaluación preliminar del uso de técnicas de offloading en aplicaciones de Industrial AIoT, y tomando como caso de estudio la detección de personas mediante modelos YOLO ejecutados en un nodo Fog con acelerador Hailo8.

Los resultados experimentales confirman que la descarga de tareas hacia un nodo de mayor capacidad computacional permite ejecutar modelos de detección avanzados en sistemas donde los nodos sensores presentan limitaciones severas de procesamiento. Sin embargo, el análisis detallado de los tiempos muestra que la inferencia no constituye el único ni necesariamente el principal componente del retardo total. De hecho, etapas como la carga de imagen, transmisión y gestión de colas representan un porcentaje significativo del tiempo total de procesamiento, llegando a superar el 60% en algunos modelos evaluados. También se observa que modelos de complejidad media ofrecen un compromiso adecuado entre precisión y latencia, mientras que modelos más complejos como YOLO11s incrementan el tiempo total sin una mejora proporcional en escenarios industriales concretos. Esto evidencia que la selección del modelo debe realizarse considerando el sistema completo y no únicamente métricas de precisión aisladas.

Asimismo, la incorporación de una etapa de filtrado previo en el nodo sensor se revela como un mecanismo clave para mejorar la escalabilidad del sistema, reduciendo la carga de transmisión y procesamiento en el nodo Fog, lo que resulta especialmente relevante en entornos con múltiples cámaras.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el offloading en aplicaciones AIoT industriales es una estrategia viable y eficiente, pero su rendimiento depende críticamente del equilibrio entre capacidad de red, arquitectura de procesamiento y selección del modelo de IA. Como trabajo futuro, se plantea profundizar en el análisis estadístico del sistema bajo distintas cargas de red, evaluar el consumo energético completo del sistema y explorar estrategias adaptativas de selección dinámica de modelo en función de las condiciones operativas

## REFERENCIAS

[1] Sattar Awaisi, Kamran; Ye,Quiang; Sampalli, Srinivas (2025). "A Survey if Industrial AIoT: Opportunities, Challenges, and Directions". *IEEE Access*, v. 12, n. p.p. 96946.96996. http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3426279

[2] S. Liu et al, “Enabling Resource-Efficient AIoT System with Cross-Level Optimization: A Survey,” IEEE Communication Surveys Tutorials, vol. 26, no. 1, pp. 389-427, 2024

[3] T. Hafeez; L. Xu; G. Mcardle, “ Edge Intelligence for Data Handling and Predictive Maintenance in IIoT,” IEEE Access, vol. 9, pp, 49355-49371, 2021

# Desarrollo de materiales sostenibles con funcionalidad antioxidante mediante valorización de residuos vegetales

**Ivorra-Martinez, Juan[(1)], Lazaro-Hdez., Carlos [(1)], Fenollar, Octavio[(1)], Garia-Sanoguera, David[(1)]**

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València, Alcoy, España juaivmar@doctor.upv.es, carlaher@epsa.upv.es, ocfegi@epsa.upv.es, dagarsa@dimm.upv.es*

## RESUMEN

La creciente demanda de materiales poliméricos más sostenibles impulsa la búsqueda de alternativas basadas en recursos renovables y en la valorización de residuos agroalimentarios. En este trabajo se evalúa el efecto de incorporar directamente subproductos vegetales en una matriz de polietileno, prestando especial atención a su influencia sobre la estabilidad oxidativa del material. En concreto, se estudia el aprovechamiento de subproductos procedentes del níspero de cultivo local. Una fruta que tras su consumo o procesado genera como residuos principales la piel y el hueso, fracciones que pueden ser revalorizadas como recursos funcionales. La selección de estos subproductos permite analizar de forma directa la contribución a la capacidad antioxidante del polietileno. Las formulaciones fueron obtenidas mediante procesado en fundido, combinando extrusión e inyección. Posteriormente se caracterizaron para evaluar su comportamiento térmico y funcional. Los resultados muestran que la incorporación de estos residuos vegetales favorece un incremento significativo de la resistencia frente a la oxidación respecto al polímero sin carga. Este comportamiento se relaciona con la presencia natural de compuestos antioxidantes en las fracciones empleadas, especialmente en la piel. La propuesta demuestra que los residuos agroalimentarios pueden actuar como aditivos funcionales de origen natural, contribuyendo al desarrollo de materiales poliméricos sostenibles.

**Palabras clave:** níspero, antioxidante, economía circular, polímero.

## INTRODUCCIÓN

El uso de polímeros reforzados con cargas de origen natural o reciclado representa un avance importante para distintas industrias y también desde el punto de vista ambiental. Este tipo de materiales compuestos permite obtener productos con mejores prestaciones mecánicas y mayor vida útil, al mismo tiempo que favorece modelos de economía circular mediante la reducción del consumo de recursos fósiles y la disminución del impacto ambiental [1; 2].

El níspero, cuyo nombre científico es *Eriobotrya japonica*, se cultiva principalmente en regiones como China y España. En particular, la comarca de la Marina Baixa, situada en la provincia de Alicante, destaca como una de las zonas productoras más relevantes de Europa. Esta área forma parte de la “Denominación de Origen Protegida (DOP) Níspero de Callosa d’en Sarrià” [3]. Debido a su contenido en almidón y compuestos antioxidantes, los subproductos generados durante su procesado, como las semillas o la piel, presentan un elevado potencial como cargas naturales para el desarrollo de composites más sostenibles [4; 5].

El origen renovable de estos residuos y la presencia de antioxidantes son aspectos de especial interés en el diseño de materiales sostenibles, ya que pueden contribuir a

mejorar la durabilidad del material [6]. En el caso de las poliolefinas, los antioxidantes desempeñan un papel fundamental al limitar los procesos de degradación oxidativa y fotoquímica, los cuales pueden deteriorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Aunque tradicionalmente se han empleado antioxidantes sintéticos, las preocupaciones asociadas a su posible toxicidad han impulsado la búsqueda de alternativas naturales. En este contexto, diversos polifenoles de origen natural han mostrado capacidad para aumentar la estabilidad térmica de las poliolefinas, retrasando la oxidación térmica y estabilizando los radicales libres, lo que puede prolongar la vida útil del material. Además, el empleo de aditivos naturales contribuye a formular polímeros más sostenibles, reduciendo la dependencia de compuestos sintéticos [7].

Asimismo, diferentes investigaciones han demostrado que residuos agroindustriales, como las pieles de mango o de plátano, pueden valorizarse mediante su incorporación en biocomposites, mejorando propiedades como el comportamiento mecánico. En algunos casos, estos materiales presentan prestaciones superiores a las de otros materiales sostenibles, por lo que constituyen una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental asociado a los composites convencionales, disminuir la generación de residuos y promover el desarrollo de materiales más respetuosos con el medio ambiente.

## OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar materiales compuestos sostenibles a partir de polietileno de origen renovable de baja densidad reforzado con subproductos del níspero, concretamente hueso, piel y una mezcla de ambos en su proporción natural. Para ello, se pretende valorizar residuos de níspero mediante su transformación en cargas naturales en forma de polvo y su posterior incorporación en una matriz polimérica renovable. Asimismo, se busca estudiar la influencia de estas cargas sobre las propiedades de los composites obtenidos, especialmente en relación con su comportamiento mecánico, térmico y su posible capacidad antioxidante. De este modo, el trabajo pretende contribuir al desarrollo de materiales más sostenibles, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales de origen local.

## EXPERIMENTAL

Se empleó un polietileno biobasado de baja densidad (LDPE) de grado comercial, concretamente el SPB608, suministrado por Braskem (São Paulo, Brasil). Este polímero se obtiene a partir de etanol renovable procedente de la caña de azúcar y presenta un índice de fluidez en masa (MFI) de 30 g/10 min, medido a 190 °C y 2,16 kg según la norma ASTM D1238. Además, su contenido de carbono de origen renovable es, como mínimo, del 95 %.

Las cargas utilizadas procedían de nísperos amparados por la “Denominación de Origen Protegida (DOP) Níspero de Callosa d’en Sarrià”. Los frutos fueron procesados manualmente con el objetivo de obtener un material en forma de polvo. Para ello, se aprovecharon distintos subproductos del níspero como cargas, incorporándolos en las proporciones indicadas en la Tabla 1.

Los subproductos fueron sometidos previamente a un proceso de secado en una estufa con circulación de aire a 60 °C durante 48 horas. Posteriormente, el material seco fue triturado hasta obtener el polvo utilizado para la preparación de los composites.

**Tabla 1.** Muestras fabricadas para el trabajo experimental.

| Muestra | PE (wt.%) | Hueso (wt.%) | Piel (wt.%) | Todo (wt.%) |
|---|---|---|---|---|
| PE | 100 | - | - | - |
| PE-Hueso | 70 | 30 | - | - |
| PE-Piel | 70 | - | 30 | - |
| PE-Todo | 70 | - | - | 30 |

El polietileno se mezcló con los distintos subproductos seleccionados mediante extrusión de doble husillo. Las formulaciones se procesaron en un microcompounder de doble husillo Xplore MC 15 HT, con una capacidad de 15 $cm^3$. Previamente al procesado, todos los componentes fueron pesados de forma precisa utilizando una balanza analítica. Las mezclas se sometieron a un ciclo térmico a 160 °C, con una velocidad de giro de 100 rpm durante 4 minutos. Posteriormente, las muestras normalizadas se obtuvieron mediante moldeo por microinyección empleando una unidad Xplore IM 12, a una temperatura de 160 °C y una presión de inyección de 8 bar.

Se ensayó el comportamiento térmico mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) mediante el uso de un Mettler Toledo 821 de Mettler-Toledo Inc. (Schwerzenbach, Switzerland). Para el ensayo se programó una rampa de calentamiento desde 30 °C hasta 205 °C en atmósfera de aire, con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min. A continuación, se mantuvo la muestra en condiciones isotermas a 205 °C durante 400 minutos. Este procedimiento permitió determinar el tiempo de inducción a la oxidación (OIT), empleado como indicador de la estabilidad oxidativa del material.

Las propiedades mecánicas de las muestras se determinaron mediante ensayos de tracción realizados en una máquina universal de ensayos ELIB 30, fabricada por S.A.E. Ibertest (Madrid, España). Los ensayos se llevaron a cabo sobre probetas normalizadas, siguiendo las directrices establecidas en la norma ISO 527-3:2019.

Para la caracterización se empleó una célula de carga de 5 kN y una velocidad de desplazamiento del cabezal de 10 mm/min. Se analizaron seis probetas por cada formulación bajo condiciones ambientales estándar. A partir de estos ensayos se obtuvieron los principales parámetros mecánicos del material: la resistencia a tracción ($\sigma$), la deformación a rotura ($\varepsilon$) y el módulo elástico o módulo de tracción (E).

## RESULTADOS

En los ensayos de DSC isotermo (Figura 1), los procesos de oxidación se identifican mediante la aparición de una reacción exotérmica. Este proceso se inicia con la ruptura térmica de enlaces C-H, generando radicales alquilo que reaccionan con el oxígeno para formar radicales peroxi, acelerando así la degradación del material. Además, la acumulación de grupos carbonilo, especialmente cetonas estables, favorece el deterioro del polímero en condiciones de alta temperatura. Este fenómeno da lugar a una señal exotérmica detectable mediante DSC.

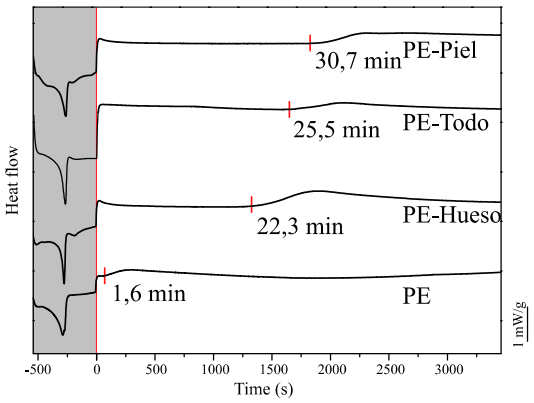



**Figura 1.** DSC isotermo para la obtención de capacidad antioxidante.

Los subproductos empleados en este estudio presentan una elevada actividad antioxidante, lo que puede contribuir a mejorar la estabilidad frente a la oxidación. En este sentido, se ha descrito que el hueso de níspero contiene una alta concentración de compuestos antioxidantes. Asimismo, la piel del níspero contiene antioxidantes como el ácido ferúlico, el ácido gálico y el ácido p-cumárico. Los antioxidantes polifenólicos, entre los que se incluyen ácidos fenólicos, flavonoides y taninos, son ampliamente utilizados para inhibir la oxidación en materiales poliméricos. Su acción se basa en la neutralización de radicales libres mediante la donación de átomos de hidrógeno o electrones, interrumpiendo así las reacciones en cadena responsables de la degradación oxidativa [8].

Los resultados muestran diferencias claras en el OIT en función del tipo de subproducto incorporado. La mejora más significativa se observó en las formulaciones con piel, atribuida a su elevada concentración de compuestos antioxidantes, los cuales favorecen una mayor resistencia frente a la oxidación [9]. Mientras que el PE sin modificar muestra una baja resistencia a la inducción de la oxidación térmica con 1,6 minutos. Este comportamiento es completamente diferente cuando se introducen los subproductos del níspero. El mayor de los incrementos se produce tras la introducción de la piel, esta presenta un alto contenido en antioxidantes que otorga un incremento en el parámetro OIT hasta los 30,7 minutos. El menor de los cambios se produce con la introducción del hueso del níspero. En este sentido el hueso tiene una composición predominante en almidón y por lo tanto menor presencia de antioxidantes. En lo que respecta a la composición con mezcla de hueso y piel, el comportamiento tal y como se espera es intermedio. En definitiva la presencia de antioxidantes tiene un efecto altamente beneficioso para la mejora del parámetro OIT.

Las propiedades mecánicas de los composites desarrollados con subproductos de níspero se recogen en la Tabla 2. El polímero base, LDPE, presenta un comportamiento dúctil y flexible, caracterizado por un módulo y una resistencia a tracción relativamente bajos. Este comportamiento se asocia a la elevada movilidad de las cadenas poliméricas, lo que limita parcialmente sus prestaciones mecánicas. En este estudio, el PE sin carga presentó una resistencia a tracción de 10,1 MPa, un módulo de tracción de 235 MPa y una elongación a rotura del 86,5 %, valores acordes con los descritos previamente para este tipo de polietileno [10].

La incorporación de cargas lignocelulósicas procedentes del níspero, sin el uso de aditivos, produjo una disminución significativa tanto de la resistencia a tracción como de la elongación a rotura, con valores de resistencia inferiores a 6 MPa y deformaciones por debajo del 30 %. Este descenso se atribuye al efecto de concentración de tensiones

generado por la presencia de partículas vegetales en la matriz polimérica, lo que dificulta la transferencia eficiente de esfuerzos y reduce la deformabilidad del material. Respecto a la rigidez de la muestra, se presenta un incremento de los valores de módulo elástico debido a un efecto de rigidización [11].

El composite PE-Hueso mostró la menor elongación a rotura, con un valor del 25,9 %, comportamiento asociado a la limitada plasticidad del polvo de hueso, rico en almidón. Por otro lado, la incorporación de piel de níspero introdujo una fracción principalmente lignocelulósica, compuesta mayoritariamente por celulosa, hemicelulosa y lignina [16]. Esta carga contribuyó a aumentar la rigidez del material, reflejada en un mayor módulo de tracción. Finalmente, la formulación que combina piel y hueso presentó un comportamiento mecánico intermedio, resultado de la contribución conjunta de ambas fracciones residuales.

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas

| Muestra | **Tensión de rotura (MPa)** | **Elongación de rotura (%)** | **Módulo elástico (MPa)** |
|---|---|---|---|
| PE | 10.1 ± 0.6 | 86.5 ± 2.2 | 235 ± 10 |
| PE-Hueso | 5.6 ± 0.4 | 25.9 ± 3.1 | 329 ± 12 |
| PE-Piel | 5.6 ± 0.5 | 28.3 ± 2.3 | 265 ± 11 |
| PE-Todo | 5.5 ± 0.6 | 28.2 ± 1.5 | 251 ± 10 |

## CONCLUSIONES

Las formulaciones desarrolladas mediante extrusión de doble husillo, seguida de moldeo por inyección, combinan una matriz polimérica de origen biobasado, concretamente polietileno, con subproductos del níspero. Se emplearon distintos subproductos de este fruto, incluyendo el hueso y la piel. Para ello, se desarrollaron tres tipos de formulaciones mediante la incorporación del hueso, la piel y una combinación de ambos subproductos. El uso de subproductos del níspero permite introducir materiales lignocelulósicos procedentes de residuos frutícolas, promoviendo así los principios de la economía circular. La mejora más destacada en las formulaciones desarrolladas fue el aumento de la actividad antioxidante, evidenciado mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). Se observó un incremento del tiempo de inducción a la oxidación (OIT) en comparación con el PE sin carga, lo que indica una mayor estabilidad oxidativa. Este comportamiento antioxidante sugiere posibles aplicaciones en envases activos, contribuyendo a una mejor conservación de los alimentos. Respecto a las propiedades mecánicas, la introducción de cargas da lugar a una reducción de la resistencia a tracción respecto al polietileno sin modificar. Así mismo hay una reducción de la elongación de la rotura. A cambio se produce un incremento de la rigidez debido a un efecto de refuerzo.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto PID2023-152869OB-C22 y del proyecto TED2021-131762A-I00, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR. Los autores también agradecen a la Generalitat Valenciana - GVA, mediante las ayudas CIGE/2023/46 y CIAICO/2023/253, el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS


[1] Liu;Desai;Sun;Ren;Pathan;Dabir;Ashok;Hou;Pan;Guo;Bhagat. (2024). "An overview of sustainable biopolymer composites in sensor manufacturing and smart cities". *Advanced Composites and Hybrid Materials, v.7*, n. 5, pp. 146. https://doi.org/10.1007/s42114-024-00938-y

[2] Sabu Mathew;Jaiswal;Jaiswal. (2025). "A comprehensive review on hydrophobic modification of biopolymer composites for food packaging applications". *Food Packaging and Shelf Life, v.48*, n., pp. 101464. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101464

[3] González-Domínguez;Alves;León;Armengol. (2017). "Characterization of Botryosphaeriaceae species associated with diseased loquat (Eriobotrya japonica) in Spain". *Plant Pathology, v.66*, n. 1, pp. 77-89. https://doi.org/10.1111/ppa.12556

[4] Maher;Yassine;Sofiane. (2015). "Anti-inflammatory and antioxidant properties of Eriobotrya japonica leaves extracts". *Afr Health Sci, v.15*, n. 2, pp. 613-620. https://doi.org/10.4314/ahs.v15i2.39

[5] Turola Barbi;Teixeira;Hornung;Ávila;Hoffmann-Ribani. (2018). "Eriobotrya japonica seed as a new source of starch: Assessment of phenolic compounds, antioxidant activity, thermal, rheological and morphological properties". *Food Hydrocolloids, v.77*, n., pp. 646-658. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.006

[6] Fang;Liu;Guo;Goksen;Tosif;Jafarzade;Ezati;Pandi. (2025). "Valorization of mango byproducts for sustainable active packaging: Advances in functionalized biopolymer films". *Food Chemistry: X, v.30*, n., pp. 102961. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102961

[7] Ordoñez;Atarés;Chiralt. (2022). "Biodegradable active materials containing phenolic acids for food packaging applications". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v.21*, n. 5, pp. 3910-3930. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13011

[8] Brito;Hlushko;Abbott;Aliakseyeu;Hlushko;Sukhishvili. (2021). "Integrating Antioxidant Functionality into Polymer Materials: Fundamentals, Strategies, and Applications". *ACS Applied Materials & Interfaces, v.13*, n. 35, pp. 41372-41395. https://doi.org/10.1021/acsami.1c08061

[9] Liu;Zhang;Huang;Fu;Wei;Yu;Han;Tang. (2025). "Preparation and structural characteristics of polysaccharides from loquat peel waste, and their preliminary bioactivities". *Journal of the Science of Food and Agriculture, v.105*, n. 2, pp. 1343-1355. https://doi.org/10.1002/jsfa.13924

[10] Ramli. (2024). "A comprehensive review on utilization of waste materials in wood plastic composite". *Materials Today Sustainability, v.27*, n., pp. 100889. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100889

[11] Jubinville;Esmizadeh;Tzoganakis;Mekonnen. (2021). "Thermo-mechanical recycling of polypropylene for the facile and scalable fabrication of highly loaded wood plastic composites". *Composites Part B: Engineering, v.219*, n., pp. 108873. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108873

# EXPERIENCIA DE COMPRA EN ENTORNOS DE MODA RÁPIDA. ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL EXCESO DE PRODUCTOS Y DEL SERVICIO AL CLIENTE EN LA EXPERIENCIA DE COMPRA MEDIANTE NEUROMARKETING

**Serna-Zuluaga, Juan Camilo[(1)], Leon Pabon, Karen Stefanny[(2)], Amado Bermúdez, Jennyfer[(3)], Vera, Camilo[(4)]**

*(1) Universitat Politècnica de València (España), jcserzu1@upv.es*
*(2) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), leonpabonstefany@gmail.com*
*(3) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), Jennyfer.amado@usa.edu.es*
*(4) Universidad Eafit (Colombia), cverase@eafit.edu.co*

## RESUMEN

Este capítulo analiza el impacto del exceso de productos y la calidad del servicio al cliente en la experiencia de compra de ZARA, desde una perspectiva de neuromarketing y experiencia de usuario. En la moda rápida, la sobrecarga de opciones es un fenómeno recurrente que influye en la percepción de marca, la toma de decisiones y el bienestar emocional del consumidor. Mediante una metodología experimental que combina técnicas biométricas —como *eye tracking* y respuesta galvánica de la piel— con herramientas cualitativas, se evalúa cómo los estímulos visuales y la organización del entorno físico y digital de ZARA afectan la atención, el estrés y la satisfacción del usuario.
Los resultados evidencian que una alta densidad de productos genera fatiga visual, dificultad en la selección y una activación emocional asociada al estrés. Asimismo, la falta de un servicio personalizado intensifica estas respuestas negativas, debilitando la experiencia global. Este trabajo aporta una reflexión crítica sobre la necesidad de replantear las estrategias de presentación de producto y atención en el sector, proponiendo mejoras para optimizar la compra y fortalecer la relación emocional entre el consumidor y la marca.

**Palabras clave:** Neuromarketing; experiencia de compra; eye tracking; sobrecarga de opciones; moda rápida; experiencia de compra, percepción de marca.

## INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento del consumidor ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, incorporando aportes de la neurociencia cognitiva con el fin de comprender los procesos inconscientes que influyen en la toma de decisiones. Diversas investigaciones han demostrado que una parte mayoritaria de las decisiones humanas se produce de manera no consciente, influenciada por emociones, memoria y atención [1, 2]. En este contexto, el neuromarketing surge como una disciplina que integra conocimientos de la neurociencia, la psicología y el marketing para analizar la respuesta del individuo frente a estímulos comerciales [3].

Kahneman [2] cuestiona el modelo clásico de decisión racional e introduce la teoría de los sistemas duales de pensamiento, distinguiendo entre un sistema rápido, automático y emocional, y un sistema lento, deliberativo y analítico. En entornos de compra altamente saturados, como los propios del sector de la moda rápida, el sistema intuitivo adquiere un papel predominante, aumentando la probabilidad de fatiga cognitiva, errores de decisión y estrés del consumidor.

La denominada paradoja de la elección sostiene que un exceso de alternativas no incrementa necesariamente la satisfacción del consumidor, sino que puede generar bloqueo decisional, ansiedad y arrepentimiento posterior a la compra [4]. Este fenómeno resulta especialmente relevante en el modelo de negocio de la *fast fashion*, caracterizado por una elevada rotación de productos, colecciones amplias y una fuerte estimulación visual.

ZARA, como referente global de la moda rápida, ha construido su ventaja competitiva a partir de la variedad, la inmediatez y la actualización constante de su oferta [5]. Sin embargo, esta estrategia también ha generado una elevada densidad visual en tienda y en su plataforma digital, lo que puede afectar negativamente la experiencia del usuario, la percepción de orden y el control del proceso de compra [6].

Desde la perspectiva de la experiencia de usuario (UX), los espacios comerciales deben concebirse como entornos de interacción donde el diseño, la jerarquía visual y el acompañamiento del servicio al cliente influyen directamente en la percepción de comodidad y eficiencia [7]. El uso de herramientas biométricas como el *eye tracking* permite identificar patrones de atención visual, áreas de interés (AOI) y recorridos perceptivos, aportando evidencia empírica para el análisis de la experiencia de compra [8].

### Metodología

La investigación adopta un enfoque experimental y descriptivo, propio de los estudios de neuromarketing aplicados al análisis de la experiencia de compra. Se combinan técnicas cuantitativas de registro biométrico con observación estructurada, con el objetivo de obtener datos objetivos sobre la atención visual y la activación emocional de los consumidores en entornos de compra de ZARA.

### Muestra

La muestra estuvo compuesta por 10 participantes, seleccionados mediante un proceso de filtrado previo (*screener*) que permitió asegurar la adecuación al público objetivo del sector moda. El perfil incluyó mujeres (70%) y hombres (30%), con edades comprendidas entre los 18 y 45 años, pertenecientes a un nivel socioeconómico medio-alto y con afinidad por la compra frecuente de prendas de vestir.

### Etapas del estudio experimental

El protocolo comenzó con la bienvenida y firma del consentimiento informado de los participantes. Posteriormente, se colocaron y calibraron los dispositivos de *eye tracking* y los sensores de respuesta galvánica de la piel (GSR). Durante la fase experimental, los sujetos se expusieron a entornos de compra reales (físicos y digitales) de ZARA con alta densidad de producto para registrar sus patrones de atención visual y activación emocional. Finalmente, se retiraron los sensores y se entregó un incentivo simbólico.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto de la elevada densidad de productos y la calidad del servicio al cliente en la experiencia de compra física y digital de la marca ZARA, utilizando técnicas de neuromarketing.

Como objetivos específicos, se plantean:

Objetivo Específico 1: Identificar los patrones de atención visual y las áreas de interés (AOI) de los consumidores mediante *eye tracking*.

Objetivo Específico 2: Medir los niveles de activación emocional, estrés y frustración durante el proceso de decisión de compra a través del registro de la respuesta galvánica de la piel (GSR).

Objetivo Específico 3: Analizar cómo la sobrecarga cognitiva y la falta de acompañamiento influyen en la percepción global de satisfacción y eficiencia de la experiencia de usuario.

## RESULTADOS

Los resultados se obtuvieron a partir del análisis de los registros de eye tracking, representados mediante mapas de calor, mapas de fijaciones y mapas de opacidad, siguiendo el modelo metodológico habitual en estudios de neuromarketing.

### Datos conjuntos (hombres y mujeres)

En primer lugar, se analizaron los datos conjuntos de todos los participantes, mediante la superposición de los mapas individuales generados por el software de eye tracking.

Previo al análisis, se definieron las áreas de interés (AOI), correspondientes a zonas con alta concentración de productos, expositores centrales y áreas de paso.

El mapa de calor permite identificar las zonas que concentraron mayor atención visual. Los colores cálidos evidencian una fuerte fijación en áreas con alta densidad de producto, especialmente en expositores centrales y prendas ubicadas a la altura de los ojos.




**Figura 1. Áreas de interés (AOI) del entorno de compra de ZARA. Fuente: Elaborado por los autores.**

Finalmente, el mapa de fijaciones representa el recorrido visual de los consumidores, indicando el orden y la duración de las fijaciones.



**Figura 2. Mapa de calor y mapa de fijaciones por Eye Tracking del entorno de compra de ZARA. Fuente: Elaborado por los autores.**

Los resultados evidencian un alto nivel de dispersión visual y múltiples fijaciones cortas, lo que sugiere sobrecarga cognitiva y dificultad para priorizar estímulos relevantes.

## Análisis GSR

La Respuesta Galvánica de la Piel (GSR) mide los cambios en la conductancia de la piel, que están directamente relacionados con la actividad del sistema nervioso autónomo. Estos cambios suelen estar asociados con respuestas emocionales, como el estrés, la excitación, la sorpresa, la ansiedad, o incluso la frustración.

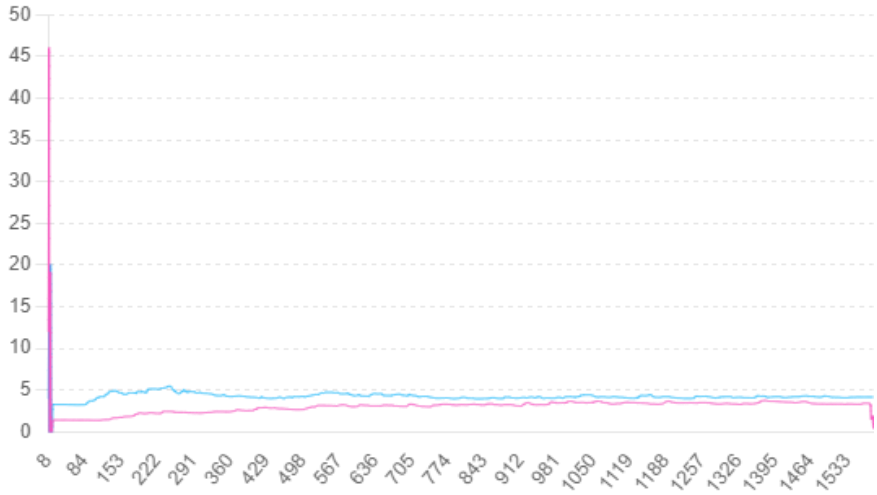



**Figura 3. Gráfica de respuesta galvánica de la piel (GSR). Fuente: Elaborado por los autores.**

## Análisis Detallado de las Emociones:

Los registros de GSR (Figura 3) revelan diferencias en el flujo emocional de las sesiones. En la Sesión 1 (línea fucsia), se observa un pico inicial significativo que sugiere un impacto emocional intenso y estrés temprano al enfrentarse a un entorno visualmente abrumador, seguido de picos menores vinculados a la frustración e indecisión durante la selección de productos. Por el contrario, la Sesión 2 (línea azul) muestra un aumento gradual de la conductancia, indicando una acumulación progresiva de estrés e incomodidad, con picos específicos asociados a la dificultad para localizar

artículos o a interacciones insatisfactorias con el servicio. En conjunto, predomina un espectro de emociones negativas (frustración, ansiedad, estrés e indecisión), mitigadas únicamente por picos puntuales de excitación positiva al hallar un producto de interés. Estos datos confirman el impacto adverso de la sobrecarga de oferta y la baja asistencia en la usabilidad emocional de la marca.

**Emociones producidas:**

Frustración y Estrés: Ambos participantes parecen haber experimentado emociones de frustración y estrés en varios puntos durante su experiencia de compra.

Indecisión y Ansiedad: La presencia de múltiples picos en la GSR podría indicar momentos de indecisión o ansiedad, particularmente en un entorno donde la abundancia de opciones podría haber abrumado al consumidor, dificultando la toma de decisiones rápida y efectiva.

Excitación: Aunque los picos pueden ser indicadores de estrés, también podrían señalar momentos de excitación positiva, como cuando un participante encuentra un producto deseado.

Finalmente, para concluir este análisis de la GSR. La GSR de ambas sesiones sugiere que los participantes experimentaron un rango de emociones principalmente negativas, como estrés, frustración, ansiedad e indecisión, con posibles momentos de excitación cuando encontraron productos de interés. Estas respuestas emocionales son indicativas de una experiencia de compra potencialmente insatisfactoria, Produciendo efectos negativos de la sobrecarga de productos y la calidad del servicio en la experiencia del cliente en Zara.

**Análisis de experimental digital**

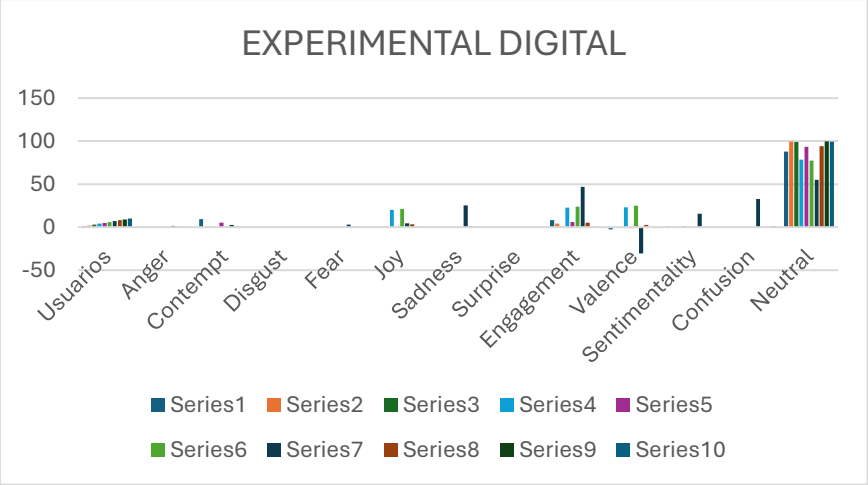



**Figura 4. Tabla experimental digital. Fuente: Elaborado por los autores.**

La mayoría de los usuarios presentaron una alta neutralidad en sus emociones, con pocos cambios en su engagement y sentimiento general. Los usuarios 4 y 9 destacan por tener sentimientos positivos y niveles más altos de engagement, lo que sugiere una mayor respuesta emocional en comparación con los otros. En general, la confusión fue baja para la mayoría, con algunas excepciones notables.

## CONCLUSIONES

Los hallazgos de este estudio confirman que la sobrecarga de opciones en ZARA tiene un impacto significativo en la experiencia del consumidor. Aunque la abundancia de productos refuerza la percepción de variedad y tendencia, también genera estrés, confusión y una menor satisfacción durante el proceso de compra. Desde una perspectiva de neuromarketing, la activación emocional registrada indica que los entornos altamente saturados estimulan respuestas de alerta más que de disfrute. La falta de un servicio al cliente proactivo y personalizado agrava esta situación, ya que el consumidor se enfrenta solo a un entorno complejo sin una guía clara.

Se concluye que ZARA podría mejorar sustancialmente la experiencia de compra mediante estrategias orientadas a reducir la carga visual, optimizar la jerarquía de productos y reforzar el papel del personal de atención al cliente como facilitador del proceso de decisión. Estas acciones no solo contribuirían al bienestar del consumidor, sino que también fortalecerían la percepción de la marca y la lealtad a largo plazo. También se ha observado que la calidad del servicio al cliente en las tiendas físicas de ZARA es inconsistente, lo que empeora la experiencia de compra. La falta de proactividad y la actitud poco colaborativa del personal contribuyen a una percepción negativa de la marca, lo que indica la necesidad urgente de mejorar la capacitación y actitud del equipo de ventas. Este aspecto es crucial en un entorno donde la experiencia del cliente se está convirtiendo en un factor diferenciador en el competitivo mercado de la moda rápida. Un estudio de campo demostró que la interacción con el personal de la tienda a menudo no cumple con las expectativas de los clientes, lo que no solo afecta su satisfacción inmediata, sino que también repercute en la lealtad a la marca a largo plazo.

## REFERENCIAS

[1] Damasio, Antonio (1994). "El error de Descartes: la emoción, la razón y el cerebro humano". Barcelona: Crítica.

[2] Kahneman, Daniel (2012). "Pensar rápido, pensar despacio". Barcelona: Debate.

[3] Braidot, Néstor (2006). "Neuromarketing: neuroeconomía y negocios". Buenos Aires: Néstor Braidot.

[4] Schwartz, Barry (2004). "The paradox of choice: Why more is less". New York: HarperCollins.

[5] Martínez, David (2019). "Zara: Visión y estrategia de Amancio Ortega". Barcelona: Penguin Random House.

[6] Sastre, Billie. Case Study: La inexistente atención al cliente 2.0 de Zara. https://billiesastre.com

[7] Norman, Donald A. (2013). "The design of everyday things". New York: Basic Books.

[8] Poole, Alex; Ball, Linden J. (2006). "Eye tracking in human-computer interaction and usability research". En: Encyclopedia of Human Computer Interaction. Lugar de publicación: Hershey. Editado por: Claude Ghaoui, p.p. 211-219. ISBN: 1591405629

# Análisis de la experiencia de usuario en la apertura de cuenta online en entidades bancarias

**Ponce-Torres, Stephanie(1), Moreno Domínguez, Maira Alejandra(2), Luna Briñez, Laura Tatiana(3), Guacaneme Pineda, Ramón Eduardo(4)**

*(1) Universitat Politècnica de València (España), spontor@upv.es*
*(2) Universitat Politècnica de València (España), maleja.moreno.md@gmail.com*
*(3) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), laura.luna@usa.edu.es*
*(4) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), ramon.guacaneme@usa.edu.co*

## RESUMEN

Con la introducción del internet, la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías, el mundo ha presenciado un cambio a nivel global, en la actualidad los consumidores buscan la manera de simplificar procesos con el fin de obtener los mejores resultados y beneficios. Para nuestra actualidad y teniendo en cuenta la introducción de la IA, es importante que los bancos generen estrategias para mejorar la experiencia de los usuarios, cuando presencian el momento real o el momento cero, al adquirir algún servicio financiero, para generar más fidelización de marca y garantizar consumidores fieles.

Por medio de este estudio queremos identificar qué precepción presentan los jóvenes frente a la atención que brindan los bancos a través de la plataforma digital, es decir, a través de la medición de la microsudoración de la piel identificar si presentan picos altos o bajos frente a la experiencia de la plataforma digital (los estímulos del estudio); queremos identificar si los esfuerzos que hacen las entidades financieras en incluir los servicios a través de las plataformas digitales son efectivos y confiables para los clientes.

**Palabras clave:** Marketing, Neuromarketing, Neuroeconomía, Neurociencia Marketing financiero, Entidades financieras

## INTRODUCCIÓN

Los cambios digitales han traído consigo un avance del internet, la inteligencia artificial y las nuevas tecnologías, las cuales han permitido que la relación existente entre los consumidores y los servicios financieros haya experimentado un vuelco importante. En este escenario, el marketing ha evolucionado desde un enfoque transaccional hacia una perspectiva relacional, centrada en la creación de valor, la experiencia del usuario y la construcción de vínculos a largo plazo con los clientes [1].

Desde el punto de vista estratégico, el marketing se concibe como un conjunto de acciones orientadas a alinear las capacidades de la organización con las necesidades del mercado objetivo, permitiendo el desarrollo de ventajas competitivas sostenibles [2].

En el sector financiero, esta idea resulta altamente relevante debido a la naturaleza intangible de los servicios bancarios, donde la percepción de confianza, seguridad y reducción del riesgo influye directamente en la toma de decisiones del consumidor [3].

La neurociencia aporta una disciplina que permite comprender los procesos mentales y emocionales implicados en el comportamiento humano. Esta materia estudia el funcionamiento del sistema nervioso desde múltiples perspectivas —biológica, psicológica y cognitiva— con el objetivo de explicar cómo los individuos procesan la información y responden a estímulos externos [4, 5]. Estos aportes han sido primordiales para comprender la toma de decisiones en contextos financieros.

A través de la neurociencia nace el neuromarketing, definido como la aplicación de métodos neurocientíficos al análisis del comportamiento del consumidor con el propósito de optimizar las estrategias comerciales [6]. Esta disciplina permite acceder a respuestas no conscientes relacionadas con la atención, la emoción y el estrés, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados exclusivamente en encuestas o entrevistas [7].

Dentro de las herramientas del neuromarketing se encuentran las técnicas biométricas; una de ellas es la respuesta galvánica de la piel o GSR, que mide la activación emocional a partir de los cambios en la conductancia eléctrica de la piel. Esta técnica resulta de gran utilidad para evaluar la intensidad emocional frente a estímulos en tiempo real, identificando reacciones fisiológicas asociadas al estrés, la atención y el *engagement* del usuario [8].

En el ámbito bancario, el neuromarketing se complementa con la neuroeconomía, disciplina que analiza las bases neuronales que operan en la toma de decisiones a nivel económico. Diversos estudios han identificado estructuras cerebrales clave —como la amígdala y la corteza prefrontal— involucradas en la evaluación del riesgo, un factor crucial al momento de elegir productos financieros [9, 10].

Con la transformación digital de los procesos bancarios, las páginas web y las aplicaciones móviles se han convertido en los canales de primera mano para la interacción con los usuarios, especialmente con el público joven. Investigaciones previas demuestran que los usuarios valoran la rapidez, la facilidad de uso y la autonomía que ofrecen los entornos digitales, aunque mantienen una elevada sensibilidad frente a la seguridad de la información y la legitimidad de las plataformas [11]. Desde esta perspectiva, la apertura de cuentas bancarias bajo el modelo *online* depende de factores racionales y emocionales (percepción de confianza, claridad del proceso, verificación de identidad y protección de datos), convirtiendo al neuromarketing en el marco fundamental para analizar de forma integral la experiencia del usuario (UX).

**Metodología experimental**

La investigación adopta un enfoque experimental mixto con triangulación de datos. El estudio se desarrollará en el laboratorio de la universidad con una muestra de 4 participantes residentes en Valencia que no tienen vinculación previa con las entidades financieras analizadas. El procedimiento consta de dos etapas consecutivas.

En la primera fase (Página web), los usuarios acceden a las plataformas digitales de dos bancos simulando la apertura de una cuenta hasta el paso de cumplimentar la dirección de domicilio. Durante la navegación, se realiza un registro biométrico continuo mediante el software *Mindfield eSense - Skin Response* (versión 6.2.2) para identificar las activaciones fisiológicas y los picos de estrés mediante la conductancia capilar.

En la segunda fase (Encuesta), se aplica un cuestionario cualitativo post-navegación estructurado en nueve preguntas clave (análisis de recuerdo de marca, preferencia interactiva, valoración de procesos, escala de usabilidad del 1 al 5 y detección de microfricciones estresantes) para identificar el origen y la causa psicológica de las emociones registradas por el sensor biométrico.

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es identificar y analizar las activaciones emocionales, la percepción de usabilidad y los picos de estrés que experimentan los usuarios durante el proceso de simulación de apertura de una cuenta bancaria online en las plataformas web de dos entidades financieras.

Como objetivos específicos, se plantean:

a) Registrar y evaluar la intensidad de la respuesta emocional y fisiológica de los participantes mediante la tecnología de respuesta galvánica de la piel (GSR).

b) Identificar el origen y los detonantes específicos de las respuestas de estrés o frustración detectadas por el software a través de una encuesta cualitativa estructurada.

c) Comparar la experiencia de usuario (UX) entre ambas interfaces bancarias digitales en términos de usabilidad percibida, facilidad de tramitación y generación de confianza.

## RESULTADOS

### Resultados GSR

Para este estudio se puede evidenciar que la intensidad emocional alta se presentó con el Banco BBVA quien arrojo un resultado promedio de 40%, a diferencia del otro banco, en nuestro caso Banco Santander que tuvo una representación del 37%, tanto a nivel general, como en los resultados por cada usuario del estudio, como se puede ver en los siguientes gráficos.

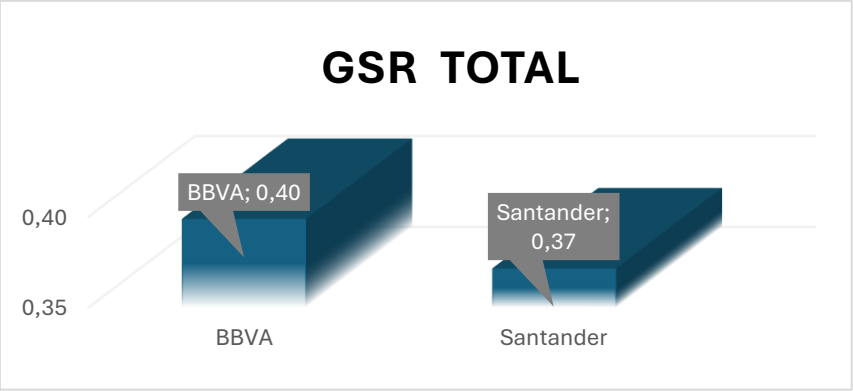



**Figura 1**. Resultados GSR. Fuente: Elaborado por los autores.

**Resultados Encuesta**

De los dos bancos, ¿Qué página web le gusto más? ¿Por qué?

En general para los usuarios la página web que más les gusto fue Santander, entre los factores que destacaron fueron:

El proceso de apertura es sencillo y fácil

El proceso es intuitivo y ordenado

Durante el proceso la página facilita que los usuarios puedan escanear el documento.

De los dos bancos ¿Qué página web no le gusto? ¿Por qué?

En general para los usuarios la página web que menos gusto fue BBVA, entre los factores que destacaron fueron:

La página está muy desordenada

El proceso no es intuitivo e incluso los pasos no son claros

El proceso es muy largo y piden muchos datos

De los dos bancos, ¿Cuál le genero más confianza para la apertura de la cuenta? ¿Por qué?

La mayoría de los usuarios les genero confianza el banco BBVA, a pesar de ser un proceso largo y algo complicado, los usuarios manifiestan que el hecho de verificar la identidad y saber el origen de los datos es un factor que da la sensación de seguridad; adicional de tener respaldo de la marca (reconocimiento) y que se asegura que se tenga claro los términos y condiciones del servicio adquirido.

De los dos bancos, ¿Cuál le pareció más fácil el proceso de apertura?

Para los usuarios el Banco Santander fue el proceso más fácil, sencillo y ágil

Califique la experiencia de apertura de cuenta siendo 1 malo y 5 bueno

BBVA 3,75

Santander 4,25

Crees que hacer apertura de cuenta por la página es más estresante o menos estresante.

La mayoría de los usuarios manifestaron que hacer la apertura de cuenta por la página es menos estresante, ya que al hacerlo por un medio digital disminuye factores como tener que hacer fila o esperar un turno para ser atendidos, el desplazamiento hacia una oficina, la espera a ser atendido por un asesor e incluso tener que hablar con el mismo.

La página web es una herramienta que los usuarios ven como una ayuda para que el proceso sea, fácil, rápido y si complicaciones.

¿Cuál fue el momento más estresante?

BBVA: Ninguno

Santander: Cuando toco seleccionar el país el origen, ya que no permite seleccionar el país e incluso solo deja seleccionar ESPAÑA

## CONCLUSIONES

Es importante que los bancos sigan haciendo la migración de sus servicios/productos a las plataformas digitales ya que el usuario les gusta ahorrar esfuerzos al tener que ir a una oficina y evitar tener contacto con otra persona.

Los usuarios opinan que el proceso a través de la página puede ser ágil y seguro, lo cual estarían dispuestos a adquirir el producto por medio de las plataformas digitales lo cual significa que los esfuerzos que ha hecho los bancos por migrar a estas plataformas ayudan a captar otro segmento.

Para los usuarios es importante que durante el proceso de apertura el banco brinde la seguridad de que no es un lugar fraudulento y que su dinero estará protegido, es vital que los bancos se encarguen también de verificar la identidad de los usuarios durante el proceso de apertura de la cuenta.

Los usuarios valoran mucho si el banco tiene esfuerzos adicionales como brindar herramientas para escanear documentos de manera fácil e incluso hacer él envió de los términos y condiciones al correo con el fin de tener la información clara y verídica.

Por más que el proceso sea ágil, el factor importante que deben brindar los bancos al momento de hacer la apertura de este tipo de cuentas a los usuarios son los sentimientos de credibilidad, seguridad y confianza, esto teniendo en cuenta que en internet existen paginas fraudulentas en donde los usuarios están siempre expuestos a ser víctimas de robos.

## REFERENCIAS

[1] American Marketing Association. The definition of marketing: what is marketing? https://www.ama.org/the-definition-of-marketing-what-is-marketing/

[2] Hartline, Michael D.; Ferrell, O. C. (2012). Estrategia de Marketing. México D.F.: Cengage Learning.

[3] Cabia, David López. Marketing financiero. https://www.economipedia.com

[4] Birknerová, Zuzana; Miško, D.; Ondrijová, I.; Čigarská, B. N. (2022). "Analysis of Consumer Awareness of Neuromarketing". TEM Journal, v. 11, n. 2, p.p. 870-875.

[5] Portellano, José Antonio (2005). Introducción a la neuropsicología. Madrid: McGraw Hill.

[6] Andreu-Sánchez, Celia; Contreras-Gracia, Paula; Martín-Pascual, Miguel Ángel (2014). "Situación del neuromarketing en España". Profesional de la Información, v. 23, n. 2, p.p. 151-157. http://dx.doi.org/10.3145/epi.2014.mar.07

[7] Cosic, D. (2016). "Neuromarketing in Market Research". Interdisciplinary Description of Complex Systems, v. 14, n. 2, p.p. 139-147.

[8] Oreja Guevara, C. (2009). "Neuromarketing". Neurología, p.p. 4-7.

[9] Bermejo, Pedro E.; Dorado, Roberto; Zea-Sevilla, María Ángeles; Sánchez-Menéndez, V. (2010). "Neuroanatomía de las decisiones financieras". Neurología, p.p. 173-181.

[10] Braidot, Néstor (2005). Neuromarketing, Neuroeconomía y Negocios. Madrid: Puerto Norte-Sur.

[11] Gómez Álvarez, I.; García Gómez, B. Core. https://core.ac.uk/download/pdf/232123072.pdf

# Piedras viajeras: inteligencia artificial y arqueometría no destructiva al servicio del estudio de rede4s prehistóricas de intercambio

**Jiménez-Puerto, Joaquín[1,2], Trull-Domínguez, Óscar [1], Gallello, Gianni[2], Orozco-Köhler, Teresa[2] , Devlin Eamonn[3]**

*(1) Dep. d'Estadística i Investigació Operativa Aplicades i Qualitat, Universitat Politècnica de València, joajipue@upv.es; otrull@eio.upv.es*

*(2) Dep. de Prehistòria, Arqueologia i Història Antiga, Universitat de València, Gianni.gallello@uv.es; Teresa.orozco@uv.es*

*(3) National Center for Scientific Research "Demokritos"; e.devlin@inn.demokritos.gr*

## RESUMEN

El análisis de procedencia de útiles de piedra pulida constituye una vía privilegiada para reconstruir redes de intercambio y movilidad de materias primas en la prehistoria reciente. Este trabajo presenta un marco metodológico integrado que combina fluorescencia de rayos X portátil (pXRF), espectroscopía Mössbauer (MöS) y clasificación supervisada mediante aprendizaje automático, aplicado a un corpus de 237 artefactos sobre rocas ofíticas básicas procedentes de 27 yacimientos de la Comunitat Valenciana (ca. 5600–2200 cal ANE). Mientras que el pXRF proporciona perfiles elementales no destructivos con alta cobertura muestral, la espectroscopía Mössbauer aporta información sobre las fases minerales portadoras de hierro inaccesible mediante análisis elemental convencional. La integración de ambas fuentes de datos en un clasificador supervisado, entrenado sobre 18 afloramientos geológicos de referencia, supera las limitaciones de las técnicas individuales y permite asignar los artefactos a fuentes específicas con cuantificación explícita de la incertidumbre. Los resultados revelan una intensificación progresiva de las redes de circulación desde el Neolítico hasta el Calcolítico, con un aumento de aprovisionamiento de larga distancia. La metodología, implementada en código abierto y con flujo de trabajo reproducible, es transferible a otros conjuntos litológicos y contextos patrimoniales.

**Palabras clave:** Análisis de procedencia; Piedra pulida; pXRF; Espectroscopía Mössbauer; Aprendizaje automático supervisado; Redes de intercambio prehistórico.

## INTRODUCCIÓN

La comprensión de los mecanismos de intercambio y circulación de bienes materiales entre comunidades prehistóricas constituye uno de los retos centrales de la arqueología moderna. El análisis de procedencia de artefactos, determinar de qué lugar geográfico procede la materia prima con la que fueron fabricados, permite reconstruir territorios de aprovisionamiento, redes de contacto intercomunitario y estructuras socioeconómicas que de otro modo serían invisibles en el registro arqueológico.

Entre los materiales más informativos para este tipo de análisis destacan los útiles de piedra pulida: hachas, azuelas, escoplos y picos fabricados sobre rocas ígneas y metamórficas densas. Su durabilidad excepcional garantiza su preservación en contextos arqueológicos durante milenios; su composición mineralógica y geoquímica registra fielmente la firma del afloramiento de origen; y su distribución espacial a través

del paisaje permite cartografiar las redes de movimiento e interacción de las comunidades que los produjeron, usaron y transmitieron.

En la parte central de la fachada mediterránea de la Península Ibérica, correspondiente grosso modo a las actuales provincias de Valencia, Alicante y Castellón, los útiles pulimentados fabricados sobre rocas ígneas básicas (diabasa, gabro y basalto) constituyen el implemento de trabajo pesado dominante durante la secuencia neolítico-calcolítica, en un arco cronológico de aproximadamente 3.400 años (ca. 5600–2200 cal ANE). La distribución geológica de los afloramientos de diabasas en esta región es inherentemente escasa en relación con la densidad de yacimientos arqueológicos conocidos [1]. La inmensa mayoría de los asentamientos neolíticos y calcolíticos carecen de fuentes locales de roca ígnea, lo que implica que los útiles que contienen llegaron a ellos mediante expediciones de aprovisionamiento dirigido, intercambio intercomunitario o ambos. Esta escasez litológica, combinada con las diferencias geoquímicas y mineralógicas sistemáticas entre afloramientos individuales, convierte al conjunto valenciano de rocas ofíticas, en un laboratorio natural excepcional para el análisis de procedencia. El presente trabajo es una primera aproximación dirigida a integrar tres técnicas analíticas complementarias, fluorescencia de rayos X portátil (pXRF), espectroscopía Mössbauer (MöS) y aprendizaje automático supervisado, en un marco multiproxy de procedencia aplicado a 237 artefactos pulimentados procedentes de 27 yacimientos de los museos arqueológicos de la Comunitat Valenciana, con el objetivo de reconstruir los patrones de circulación de materias primas durante el Neolítico y el Calcolítico en el Mediterráneo ibérico.

La investigación de procedencia sobre útiles pulimentados en el Mediterráneo ibérico cuenta con una trayectoria consolidada. Los trabajos fundacionales de Orozco-Köhler [1] establecieron el análisis petrográfico, microscopía óptica de polarización sobre secciones delgadas, como herramienta primaria para la caracterización de artefactos y afloramientos fuente. Si bien esta aproximación sigue siendo indispensable para la identificación mineral y la interpretación textural, su naturaleza inherentemente cualitativa y dependiente del observador limita la reproducibilidad y dificulta la comparación cuantitativa a escala de grandes corpus.

Trabajos posteriores incorporaron métodos geoquímicos cuantitativos [2,3]: la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) y su variante con ablación láser (LA-ICP-MS) ofrecen alta precisión analítica, pero requieren extracción de material, a menudo inasumible para objetos patrimoniales únicos, y resultan logísticamente complejos para colecciones de gran tamaño. La fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) emergió como alternativa genuinamente no destructiva, aplicable directamente sobre la superficie de los artefactos en sala de museo y que posibilita campañas analíticas de escala regional.

Investigaciones previas del grupo [4,5] han demostrado que los elementos traza de número atómico elevado, especialmente Nb, Bi y Sb, constituyen discriminantes geoquímicos fiables entre afloramientos. La aplicación de mapas auto-organizativos (SOM) a conjuntos de datos pXRF permitió una primera agrupación exploratoria y una calibración preliminar para la clasificación supervisada. Sin embargo, el análisis elemental presenta una limitación estructural: la incapacidad para distinguir entre las distintas fases minerales portadoras de hierro, cuyas proporciones relativas son uno de los indicadores más sensibles de la historia petrogenética específica de cada afloramiento. La espectroscopía Mössbauer aborda exactamente esta laguna, y su

integración con pXRF y la aplicación de diferentes técnicas de aprendizaje automático constituye el núcleo metodológico del presente trabajo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El corpus de estudio comprende 237 artefactos de piedra pulida (hachas, azuelas y escoplos de dolerita y otras rocas ígneas básicas) conservados en once instituciones museísticas de la Comunitat Valenciana, entre las que se incluyen el Museu Arqueològic Municipal Camil Visedo Moltó de Alcoi, el MARQ (Alicante), el Servei d'Investigació Prehistòrica (SIP, Valencia) y el Museu Arqueològic d'Ontinyent i la Vall d'Albaida, entre otros. Los artefactos proceden de 27 yacimientos arqueológicos que abarcan el espectro cronológico completo del uso de útiles pulimentados en la región, desde el Neolítico antiguo hasta el Calcolítico final (Fases VI–III según la periodización de Bernabeu y colaboradores [6]. El corpus de referencia geológica comprende muestras de roca fresca tomadas en 18 afloramientos de roca ofítica básica distribuidos por las provincias de Valencia, Alicante, Castellón y Albacete, incluyendo los principales tipos petrológicos representados en el registro arqueológico: diabasa, gabro, basalto, basalto y anfibolita.

El enfoque analítico se articula en torno a tres técnicas complementarias: la fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) se empleó como técnica de análisis elemental no destructivo, directamente sobre la superficie de los artefactos, sin extracción de muestra. Se registraron perfiles de 25 elementos mayoritarios y traza para el conjunto completo de muestras arqueológicas y de referencia geológica. Pese a sus limitaciones bien documentadas para elementos ligeros, los elementos traza de número atómico elevado (Nb, Bi, Sb) presentan un comportamiento discriminante robusto entre afloramientos y constituyen la columna vertebral del esquema de clasificación elemental. La espectroscopía Mössbauer (MöS), aplicada de forma sistemática a las muestras de referencia geológica, explota la absorción resonante de radiación gamma por los núcleos de $^{57}Fe$ para proporcionar información detallada sobre el estado de oxidación ($Fe^{2+}/Fe^{3+}$), el entorno de coordinación y la composición de fases de todos los minerales portadores de hierro presentes en la muestra, piroxenos, olivino, ilmenita, magnetita, hematita, maghemita, incluyendo fases amorfas. Esta información, inaccesible mediante técnicas de análisis elemental convencional, constituye una huella de fase del hierro diagnóstica del afloramiento de origen.

El marco de clasificación supervisada combina los perfiles elementales de pXRF con las firmas de fase Mössbauer mediante múltiples clasificadores de aprendizaje automático, KNN, Random Forest, Ensemble Boost y arquitecturas de deep learning, entrenados sobre el corpus de referencia geológica. La asignación de procedencia se formula en términos probabilísticos, con cuantificación explícita de la incertidumbre de clasificación, superando las limitaciones de los enfoques exploratorios no supervisados previos basados en mapas auto-organizativos (SOM).

La integración de las tres técnicas se realiza en un flujo de trabajo reproducible implementado en Python. Los vectores de características combinados (pXRF + MöS) se normalizan y se utilizan para entrenar el clasificador supervisado mediante validación cruzada estratificada sobre el conjunto de referencia. La asignación de cada artefacto arqueológico se expresa como una distribución de probabilidad sobre los grupos de afloramientos definidos, permitiendo identificar tanto asignaciones de alta confianza

como casos de señal ambigua que pueden reflejar mezcla de fuentes, selección de materia prima en zonas de afloramiento mixto, o alteración post-deposicional.

## RESULTADOS

El análisis petrográfico de secciones delgadas de los 18 afloramientos de referencia revela una notable diversidad litológica dentro de la suite ofítica valenciana, reflejando diferencias en las condiciones de cristalización, la historia de alteración post-magmática y el grado de metamorfismo regional. Los rasgos diagnósticos del ensamblaje de minerales opacos, tipo, tamaño, morfología y relaciones texturales de ilmenita, magnetita, hematita, pirita y calcopirita, muestran variabilidad sistemática entre afloramientos y constituyen el fundamento mineralógico de la discriminación espectroscópica.

La caracterización mediante pXRF identifica agrupaciones geoquímicas coherentes a nivel de afloramiento para la mayoría de los grupos, con los elementos Nb, Zr, Y y Sr como los discriminantes más robustos entre grupos. Sin embargo, determinados pares de afloramientos geográficamente próximos presentan solapamiento en el espacio elemental, poniendo de manifiesto el límite de resolución del análisis elemental en aislamiento.

Los espectros Mössbauer de las muestras de referencia muestran diferencias sistemáticas en la proporción relativa de sitios de $Fe^{2+}$ y $Fe^{3+}$, en los parámetros hiperfinos característicos de las distintas fases minerales, y en la presencia o ausencia de señales de fases amorfas o parcialmente ordenadas. La combinación de las proporciones relativas de fase (piroxeno, ilmenita, magnetita, hematita y fases mal cristalizadas) con los parámetros hiperfinos proporciona una huella de fase del hierro que discrimina con éxito todos los pares de afloramientos que presentaban solapamiento en el espacio elemental de pXRF.

El resultado más significativo es que la integración de ambas técnicas aumenta de forma sustancial el poder discriminante del marco de referencia respecto a cualquiera de las dos técnicas por separado, reduciendo la tasa de clasificaciones ambiguas del corpus arqueológico de forma apreciable.

La aplicación del clasificador supervisado integrado (pXRF + MöS) al corpus de 237 artefactos arqueológicos permite asignar con alta probabilidad la mayor parte de los útiles pulimentados analizados a grupos de afloramientos específicos de la región valenciana. Los resultados revelan un patrón de aprovisionamiento jerárquico en el que una minoría de afloramientos, especialmente los localizados en las comarcas centrales de Alicante y Valencia, concentran la mayoría de los artefactos atribuibles, sugiriendo su explotación preferencial y posible papel como nodos de redistribución en la red de intercambio regional.

El análisis de la variación temporal de los patrones de procedencia, articulado en torno al marco cronológico regional (Fases VI–III), muestra una tendencia hacia la diversificación de fuentes y el incremento de las distancias de transporte a lo largo del tiempo, coherente con la hipótesis de una intensificación progresiva de las redes de intercambio intercomunitario desde el Neolítico antiguo hasta el Calcolítico.

## DISCUSIÓN

Los resultados presentados contribuyen al debate sobre los mecanismos de circulación de materias primas líticas en la prehistoria reciente del Mediterráneo ibérico desde una perspectiva metodológica renovada. La integración de técnicas no destructivas y mínimamente destructivas con aprendizaje automático supervisado supera las principales limitaciones de los enfoques previos: la naturaleza cualitativa y dependiente del observador del análisis petrográfico, la imposibilidad del análisis elemental para discriminar fases mineralógicas portadoras del mismo elemento, y el carácter exploratorio de los clasificadores no supervisados anteriores.

Desde el punto de vista arqueológico, la identificación de afloramientos de aprovisionamiento preferencial y la cuantificación de los rangos de transporte a lo largo del tiempo permiten una evaluación más precisa de los modelos alternativos de circulación —aprovisionamiento directo, redistribución de tipo down-the-line, intercambio de ámbito regional— y de su variación a lo largo de la secuencia prehistórica regional. La coherencia de los patrones identificados con los datos independientes disponibles sobre circulación de otras materias primas (sílex, cerámicas de importación, fauna marina) refuerza la validez del marco analítico.

La arquitectura metodológica propuesta en este trabajo es modular: cada técnica puede incorporarse o sustituirse en función de la disponibilidad instrumental y de las características del corpus litológico de interés. El clasificador supervisado puede reentrenarse con nuevos datos de referencia geológica sin necesidad de rediseñar el flujo analítico completo, lo que facilita su extensión a otras regiones o tipologías de roca. Esta flexibilidad resulta especialmente relevante en el contexto actual de desarrollo de bases de datos arqueométricas de referencia a escala europea, donde la interoperabilidad entre conjuntos de datos generados con protocolos distintos representa uno de los principales desafíos metodológicos.

En el ámbito de la gestión del patrimonio arqueológico, la no destructividad del protocolo, o su carácter mínimamente destructivo en el caso de la Espectroscopía Mössbauer, lo hace directamente aplicable a fondos museísticos sin restricciones adicionales de conservación, ampliando el universo de colecciones accesibles para estudios de procedencia. La integración futura de datos de procedencia con modelos de análisis de redes sociales (SNA) y marcos bayesianos de modelización cronológica permitirá avanzar hacia una reconstrucción cuantitativa de las dinámicas de intercambio prehistórico con una resolución temporal sin precedentes en la región.

El enfoque computacional adoptado, código abierto, flujo de trabajo reproducible, resultados expresados como distribuciones de probabilidad, se alinea con los estándares emergentes de ciencia abierta y reproducibilidad en arqueología cuantitativa. Este compromiso con la transparencia metodológica contribuye a superar la opacidad que ha caracterizado históricamente una parte significativa de la literatura arqueométrica y facilita la replicabilidad y comparación con estudios futuros en otras regiones del Mediterráneo occidental.

## CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que la integración de fluorescencia de rayos X portátil, Espectroscopía Mössbauer y clasificación supervisada mediante aprendizaje automático constituye un enfoque metodológicamente robusto y escalable para el estudio de procedencia de útiles líticos pulimentados, con una capacidad discriminante

superior a la de cualquiera de las técnicas individuales. Su aplicación al corpus de rocas ofíticas valenciano (237 artefactos, 27 yacimientos, ca. 3.400 años de secuencia) ha permitido reconstruir los patrones de aprovisionamiento y circulación de materias primas durante el Neolítico y el Calcolítico en el Mediterráneo ibérico, revelando una intensificación progresiva de las redes de intercambio intercomunitario a lo largo del tiempo.

La metodología propuesta es directamente transferible a otros conjuntos litológicos y contextos geográficos, así como a otras categorías de patrimonio material cuya caracterización analítica se beneficie de la combinación de técnicas no destructivas y de análisis computacional avanzado.

## AGRADECIMIENTOS

JJP está apoyado por el programa Atracció de Talent de la Universitat de València (LIF70903507 UV-POSTDOC-26-001 ADENDA01 44859202W).

## REFERENCIAS

[1] Orozco-Köhler, Teresa (2000). Aprovisionamiento e Intercambio: Análisis petrológico del utillaje pulimentado en la Prehistoria Reciente del País Valenciano (España). British Archaeological Reports Limited.

[2] Gallello, Gianni; Orozco, Teresa; Pastor, Agustin; De La Guardia, Miguel; Bernabeu, Joan (2016). "Regional provenance of dolerite prehistoric objects through mineral analysis". *Microchemical Journal*, v. 124, p.p. 167-174. http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.018

[3] Ramacciotti, Mirco; Gallello, Gianni; Jiménez-Puerto, Joaquin; Bernabeu, Joan; Orozco Köhler, Teresa; Rubio-Barberá, Sonia; Pastor, Agustín (2022). "Non-destructive characterisation of dolerite archaeological artefacts". Microchemical Journal, v. 183, p.p. 108080. http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2022.108080

[4] Jiménez-Puerto, Joaquín; Gallello, Gianni; Orozco, Teresa (2024). "Neural Networks to Map Archaeological Lithic Artefacts". *Inżynieria Mineralna*, v. 1, n. 1, http://dx.doi.org/10.29227/IM-2024-01-41

[5] Jiménez-Puerto, J.; Devlin, E.; Gallello, G.; Orozco-Köhler, T.; Bernabeu, J. (2025). "Mössbauer spectroscopy for dolerite provenance characterization in Valencia region: A proof of concept". *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 66, p.p. 105289. http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2025.105289

[6] Bernabeu, Joan; Jiménez-Puerto, Joaquín; Escribá, P.; Pardo-Gordo, Salvador (2018). "C14 y poblamiento en las comarcas centro-meridionales del País Valenciano (c. 7000-1500 cal BC)". *Recerques del Museu d'Alcoi*, n. 27, p.p. 35-48.

# Aplicación de Sistemas *WAIV* en Estrategias de Descarga Cero de Líquidos para Tratamiento de Salmueras de Aguas Salobres

**López-Borrell, Alexis[(1)], Boronat-Castellar, Irene[(2)], Cardona, Salvador C.[(1)], López-Pérez, Maria-Fernanda[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell, s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España, e-mail: allobor1@epsa.upv.es*

*(2) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy (Alicante), España*

## RESUMEN

La gestión de salmueras generadas en procesos de desalación representa uno de los principales retos asociados a las tecnologías de separación por membranas. En este trabajo se estudió la evaporación de aguas salobres utilizando un tejido natural de bambú como medio evaporativo, evaluando su comportamiento bajo distintas condiciones climáticas representativas de la localidad de Alcoy. Los ensayos se realizaron variando la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del aire entre 0 y 4.18 $m \cdot s^{-1}$.

Los resultados experimentales mostraron que el incremento de la velocidad del aire favorece significativamente las tasas de evaporación, observándose además una mayor eficiencia en condiciones típicas de los meses estivales. A partir de los datos obtenidos se desarrolló un modelo matemático empírico basado en la diferencia de presiones de vapor y en coeficientes de transferencia de materia dependientes de la velocidad del aire. Los parámetros del modelo fueron ajustados mediante Matlab R2024a, obteniéndose una buena concordancia entre los valores experimentales y los calculados. La validación experimental del modelo mostró errores inferiores al 5 %, demostrando la viabilidad del uso de tejidos naturales de bajo coste en aplicaciones de evaporación para la concentración de salmueras y estrategias de descarga cero de líquidos.

**Palabras clave:** tejido natural, evaporación, *WAIV*, tasa de evaporación, coeficiente de transferencia de materia, modelo de transferencia, presión de vapor.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda hídrica y la limitada disponibilidad de agua dulce han convertido la gestión de los recursos hídricos en uno de los principales desafíos ambientales actuales. Aunque gran parte de la superficie terrestre está cubierta por agua, solo una pequeña fracción es accesible para el consumo humano, la agricultura y la industria. Además, el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial incrementan tanto el consumo de agua como la generación de aguas residuales con elevadas concentraciones contaminantes y salinas [1,2].

En este contexto, las tecnologías de separación mediante membranas, como la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y especialmente la ósmosis inversa (OI), se han consolidado como alternativas eficaces para la desalación y reutilización de aguas. Sin embargo, estos procesos generan corrientes de rechazo

altamente concentradas en sales, conocidas como salmueras, cuya gestión representa un importante reto ambiental y energético [3].

La elevada concentración salina de estas corrientes dificulta su tratamiento convencional y puede ocasionar impactos negativos sobre los ecosistemas acuáticos si son vertidas sin un tratamiento adecuado. Por ello, en los últimos años se han desarrollado estrategias orientadas a minimizar el volumen de residuos líquidos y maximizar la recuperación de agua y sales, reduciendo simultáneamente el consumo energético del proceso.

Entre las alternativas más prometedoras destacan los sistemas de evaporación *WAIV* (*Wind-Aided Intensified Evaporation*), basados en la intensificación de la evaporación mediante el uso de superficies absorbentes y flujo de aire. Estas tecnologías permiten concentrar salmueras con menores requerimientos energéticos que los sistemas térmicos convencionales y presentan un elevado potencial para su integración en estrategias de descarga cero de líquidos (*Zero Liquid Discharge*, ZLD) [4,5].

El presente trabajo tiene como objetivo investigar el tratamiento de aguas salobres mediante evaporación utilizando un tejido natural de bambú como superficie evaporativa, con un área efectiva de 140 x 140 mm². Para ello, se analizará el comportamiento del proceso de evaporación bajo diferentes condiciones operativas representativas de la localidad de Alcoy, evaluando la influencia de variables ambientales como la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento sobre las tasas de evaporación de una disolución salobre sintética.

Asimismo, a partir de los resultados experimentales obtenidos en los distintos ensayos, se pretende desarrollar y ajustar un modelo matemático empírico capaz de describir y predecir el comportamiento de la evaporación en diferentes escenarios operativos. De este modo, el estudio busca contribuir al desarrollo de alternativas sostenibles y de bajo coste energético para la gestión y concentración de salmueras en aplicaciones de tratamiento de aguas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos experimentales de evaporación se realizaron empleando un tejido natural de bambú (Bam) como medio evaporativo, con un área efectiva de intercambio de 140 x 140 mm². El material utilizado presentó un gramaje de 56 $g \cdot m^{-2}$ y un espesor de 0.2 mm, características que favorecen la absorción y distribución homogénea de la solución salobre sobre la superficie del tejido.

Las pruebas se desarrollaron bajo condiciones ambientales controladas mediante una cámara climática modelo ICH 260Leco, fabricada por Memmert GmbH + Co. KG (Schwabach, Alemania). Este equipo permitió fijar y mantener constantes los parámetros de operación durante cada ensayo, concretamente la temperatura del aire y la humedad relativa.

La velocidad del aire en la zona próxima al tejido evaporativo se monitorizó mediante un anemómetro de hilo caliente modelo PCE-HWA 30, comercializado por PCE Ibérica S.L. (Albacete, España), con un intervalo de adquisición de datos de 1 s. Paralelamente, la temperatura y la humedad relativa del aire se registraron utilizando un termohigrómetro Testo 635-2 de Testo S.A. (Barcelona, España), configurado con un periodo de muestreo de 20 s. Para determinar la pérdida de masa asociada al proceso de evaporación, se empleó una balanza analítica XPR303SN de Mettler-Toledo S.A.E.

(Barcelona, España), programada con una frecuencia de registro de 1 s, lo que permitió obtener un seguimiento continuo de la evaporación durante cada experimento.

El procedimiento experimental se fundamentó en la capacidad de absorción del tejido de bambú frente a una solución sintética de agua salobre, siguiendo como referencia la norma UNE-EN ISO 9073-6 relativa a métodos de ensayo para materiales no tejidos. Inicialmente, el tejido se sumergió en la solución durante (60 ± 1) s para asegurar su completa humectación. Posteriormente, se dejó escurrir el exceso de líquido durante (120 ± 3) s antes de determinar la masa inicial de agua retenida.

Una vez acondicionada la muestra, el tejido se colocó sobre una estructura soporte situada en el plato de pesaje de la balanza analítica dentro de la cámara climática. Esta configuración experimental permitió mantener el tejido suspendido y expuesto al flujo de aire, favoreciendo así la evaporación libre sobre ambas superficies del material. Durante el desarrollo de cada ensayo se registraron de forma continua la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y la variación de masa del sistema.

A partir de los datos experimentales obtenidos, se calcularon las tasas de evaporación correspondientes a las diferentes condiciones operativas estudiadas. Asimismo, estos resultados se utilizaron para determinar los coeficientes de transferencia de materia entre la fase líquida y la fase gaseosa, permitiendo posteriormente el ajuste de un modelo matemático empírico capaz de describir el comportamiento del proceso de evaporación.

El modelo matemático utilizado para el ajuste de los coeficientes de transferencia de materia se basa en el fenómeno de evaporación asociado al intercambio de masa entre la superficie líquida y el aire circundante. En este proceso, la fuerza impulsora viene definida por el gradiente de presión de vapor existente entre la disolución salobre y el ambiente. La expresión general empleada para describir la tasa de evaporación se muestra en la Ecuación 1.

$$E = k_1(v) \cdot \left[ P_v(T_{BH}) - P_{v,sat}(T_a) \cdot \left( \frac{HR}{100} \right) \right] + k_2(v) \qquad Ec.1$$

donde $E$ representa la tasa de evaporación $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, mientras que $k_1$ y $k_2$ corresponden a parámetros empíricos asociados al transporte de materia y dependientes de la velocidad del aire. Asimismo, $P_v\ (T_{BH})$ es la presión de vapor de la disolución salobre evaluada a la temperatura de bulbo húmedo, $P_{v,sat}\ (T_a)$ es la presión de vapor de saturación del agua a la temperatura del aire evaluadas en Pa y $HR$ corresponde a la humedad relativa expresada en porcentaje.

La estimación de los parámetros $k_1$ y $k_2$ se llevó a cabo mediante un procedimiento de ajuste numérico utilizando Matlab R2024a. Para el cálculo de la presión de vapor de saturación del agua se empleó una correlación basada en las formulaciones de la IAPWS [6], mostrada en la Ecuación 2.

$$P_{v,sat} = \frac{\exp\left(34.494 - \frac{4924.99}{T_a + 237.1}\right)}{(T_a + 105)^{1.57}} \qquad Ec.2$$

donde $T_a$ corresponde a la temperatura del aire en °C. Cabe señalar que esta expresión es aplicable únicamente para temperaturas superiores a 0 ºC.

Por otra parte, la presión de vapor de la disolución salobre $P_v\ (T_{BH})$ se determinó experimentalmente mediante medidas indirectas de humedad relativa en equilibrio obtenidas con el termohigrómetro Testo 635-2 para distintas temperaturas y

concentraciones de la solución sintética. La correlación utilizada para describir este comportamiento se presenta en la Ecuación 3 [7].

$$log\ (P_v) = A(m) + \frac{B(m)}{T_{BH}} + \frac{C(m)}{T_{BH}^2} \qquad Ec.3$$

donde $T_{BH}$ representa la temperatura de bulbo húmedo en la superficie del tejido, expresada en K. Los parámetros *A*, *B* y *C* dependen de la molalidad de la solución salobre y fueron ajustados mediante funciones polinómicas de tercer orden en función de la concentración de la disolución.

## RESULTADOS

Los ensayos de evaporación realizados bajo condiciones climáticas representativas de la localidad de Alcoy permitieron evaluar el comportamiento del tejido natural de bambú como medio evaporativo frente a diferentes velocidades de aire. Para ello, se trabajó con velocidades de 0 ($V_0$), 1.44 ($V_1$), 2.11 ($V_2$), 2.94 ($V_3$), 3.73 ($V_4$) y 4.18 ($V_5$) m·s$^{-1}$, cuyos resultados experimentales se presentan en la Figura 1.

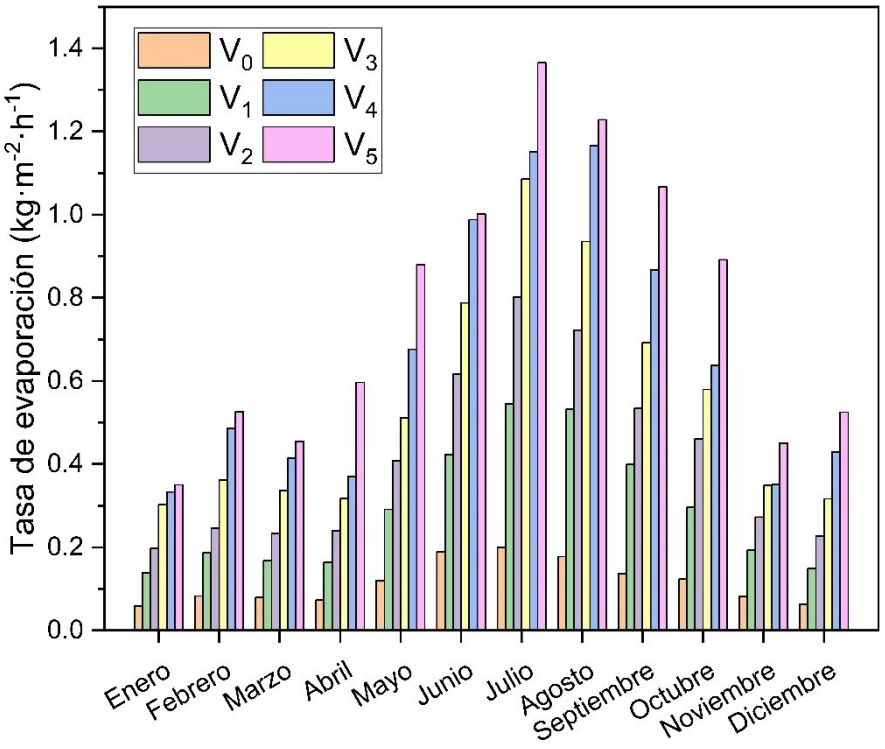



**Figura 1.** Tasas de evaporación del agua salobre en tejido de Bam a diferentes condiciones de operación. (■ $V_0$ 0 m·s$^{-1}$; ■ $V_1$ 1.44 m·s$^{-1}$; ■ $V_2$ 2.11 m·s$^{-1}$; ■ $V_3$ 2.94 m·s$^{-1}$; ■ $V_4$ 3.73 m·s$^{-1}$; ■ $V_5$ 4.18 m·s$^{-1}$).

Los resultados obtenidos muestran una clara influencia de la velocidad del aire sobre las tasas de evaporación. A medida que aumenta la velocidad del flujo de aire en contacto con el tejido, se incrementa la transferencia de materia entre la superficie líquida y el ambiente, favoreciendo así mayores tasas de evaporación. Del mismo modo, las condiciones ambientales asociadas a los meses estivales, particularmente entre junio y agosto, también propician un aumento significativo de la evaporación debido a las mayores temperaturas y menores humedades relativas del aire.

Una vez determinadas experimentalmente las tasas de evaporación, se representaron frente a la diferencia de presiones de vapor con el objetivo de obtener las pendientes de ajuste correspondientes a cada velocidad de aire ensayada. A partir de las regresiones lineales obtenidas, se calcularon los coeficientes de transferencia de materia del modelo, asociando las pendientes al parámetro $k_1$ y las ordenadas en el origen al parámetro $k_2$. El ajuste matemático de ambos coeficientes se realizó mediante Matlab R2024a. Los resultados obtenidos para los términos $k_1$ y $k_2$ se muestran en las Figuras 2a y 2b, respectivamente.

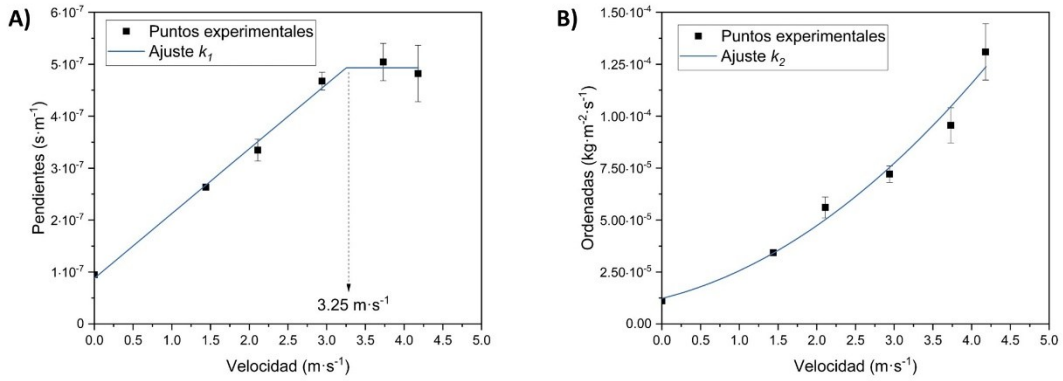



**Figura 2.** Ajuste de las pendientes y ordenadas obtenidas del ajuste lineal de las tasas de evaporación frente la velocidad para la evaporación empleando el tejido de Bam. (A) Pendientes del ajuste lineal; B) Ordenadas del ajuste lineal) (■ Puntos experimentales; **−** Ajuste de los coeficientes $k_1$ y $k_2$)

En el caso del coeficiente $k_1$, se observó un comportamiento aproximadamente lineal para velocidades de aire bajas e intermedias. Sin embargo, para velocidades superiores a 3 m·s$^{-1}$, los valores experimentales tendieron a estabilizarse, indicando la existencia de un límite en la transferencia de materia asociado al sistema evaporativo estudiado. Por este motivo, se estableció un valor constante de $4.9 \cdot 10^{-7}$ kg·s$^{-1}$·m$^{-2}$ para velocidades superiores a 3.25 m·s$^{-1}$. Para el intervalo lineal, la expresión ajustada fue de $k_1(v) = 1.2 \cdot 10^{-7} \cdot v + 3.25$.

Por otra parte, el coeficiente $k_2$ presentó una evolución no lineal con la velocidad del aire, ajustándose adecuadamente mediante una correlación cuadrática. La ecuación obtenida para describir dicho comportamiento fue de $k_2(v) = 4.2 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 + 9.2 \cdot 10^{-6} \cdot v + 1.2 \cdot 10^{-5}$.

Finalmente, el modelo matemático desarrollado fue validado experimentalmente bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, comprobándose su capacidad para reproducir adecuadamente las tasas de evaporación observadas. Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores experimentales y los predichos por el modelo, alcanzándose errores inferiores al 5 % en las condiciones evaluadas.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que el empleo de tejidos naturales de bambú constituye una alternativa prometedora para aplicaciones de evaporación orientadas al tratamiento y concentración de aguas salobres. El sistema evaluado mostró una elevada sensibilidad frente a las condiciones ambientales,

especialmente respecto a la velocidad del aire, parámetro que presentó una influencia directa sobre las tasas de evaporación alcanzadas.

El análisis experimental permitió identificar el comportamiento de los coeficientes de transferencia de materia en función de la velocidad del aire, observándose una tendencia lineal para velocidades moderadas y una estabilización del proceso a velocidades superiores a 3 $m \cdot s^{-1}$. A partir de estos resultados se desarrolló un modelo matemático empírico capaz de describir adecuadamente el fenómeno de evaporación mediante la diferencia de presiones de vapor entre la disolución salobre y el aire ambiente.

La validación del modelo bajo diferentes condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire demostró una elevada capacidad predictiva, obteniéndose desviaciones inferiores al 5 % respecto a los valores experimentales. Estos resultados evidencian el potencial de este tipo de sistemas evaporativos de bajo coste energético para su aplicación en procesos de gestión de salmueras y estrategias de descarga cero de líquidos, contribuyendo al desarrollo de tecnologías más sostenibles para el tratamiento de aguas residuales.

## REFERENCIAS


[1] Rosa, L.; Sangiorgio, M. (2025). “Global water gaps under future warming levels”. *Nature Communications*, n. 16, v. 1192. https://doi.org/10.1038/s41467-025-56517-2

[2] Ravinandrasana, V. P.; Franzke, C. L. (2025). “The first emergence of unprecedented global water scarcity in the Anthropocene”. *Nature Communications*, v. 16, n. 8281. https://doi.org/10.1038/s41467-025-63784-6

[3] Foorginezhad, S.; Zerafat, M. M.; Ismail, A. F.; Goh, P. S. (2025). “Emerging membrane technologies for sustainable water treatment: a review on recent advances”. *Environmental Science: Advances*, v. 4, n. 4, p.p. 530-570. DOI: 10.1039/D4VA00378K

[4] El-Ghandour, M.; Shehata, M.; El-Sawaf, I. A.; El-Ghafour, S. A. (2026). “Performance evaluation of a solar still using a suspended absorber plate and Fresnel lens, integrated with a wind-aided intensified evaporation system”. *Applied Thermal Engineering*, n.130543, v. 294. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130543

[5] Panagopoulos, A. (2025). “Assessing the energy footprint of desalination technologies and minimal/zero liquid discharge (MLD/ZLD) systems for sustainable water protection via renewable energy integration”. *Energies*, v. 18, n. 4, 962. https://doi.org/10.3390/en18040962

[6] Huang, J. (2018). "A simple accurate formula for calculating saturation vapor pressure of water and ice". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 57, n. 6, p.p. 1265-1272. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0334.1

[7] Patil, K.R.; Tripathi, A.D.; Pathak, G.; Katti, S.S. (1991). "Thermodynamic properties of aqueous electrolyte solutions. 2. Vapor pressure of aqueous solutions of sodium bromide, sodium iodide, potassium chloride, potassium bromide, potassium iodide, rubidium chloride, cesium chloride, cesium bromide, cesium iodide, magnesium chloride, calcium chloride, calcium bromide, calcium iodide, strontium bromide, strontium iodide, barium chloride, and barium bromide". *Journal of chemical and engineering data*, v. 36, n. 2, p.p. 225-230. https://doi.org/10.1021/je00002a021

# Valorización de la Algarroba Mediante la Recuperación de Polifenoles con Membranas de UF Regeneradas

**Torregrosa-Sánchez, Maya [(1)], Lora-García, Jaime [(1)], Cardona, Salvador C. [(1)] y López-Pérez, Maria-Fernanda [(1)]**

*(1) Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell, s/n. 03801 Alcoy (Alicante), España, e-mail: mtorsan@epsa.upv.es*

## RESUMEN

En el presente trabajo, se describe el desarrollo de un sistema de membranas en serie para extraer y separar polifenoles a partir de extractos de algarroba, impulsando la economía circular. Como innovación, la última etapa del proceso utiliza una membrana polimérica de ósmosis inversa degradada mediante limpiezas químicas controladas para operar en el rango de ultrafiltración (~15 kDa).

Los resultados demostraron la viabilidad de la regeneración y una correcta separación selectiva. Mientras que la mayoría de los polifenoles se concentraron progresivamente en las corrientes de rechazo según su tamaño molecular, los azúcares mostraron variaciones drásticas debidas a una posible repolimerización.

**Palabras clave:** membrana, sistema de membranas, algarroba, polifenoles, regeneración, capa activa, selectividad, tamaño de poro.

## INTRODUCCIÓN

Las membranas son una de las formas más habituales de tratamiento de aguas, sobre todo de aguas residuales industriales. Se utilizan principalmente por su versatilidad de rangos de tamaño de poro y su alta eficiencia en los procesos en que se utiliza. Además, cuenta con la posibilidad de distintas geometrías y materiales, lo que aporta una mayor adaptabilidad al proceso en que se aplican [1]. Asimismo, su uso también puede aplicarse a la separación de compuestos de gran valor, ya que, al presentar un rango de tamaños de poro tan amplio, las membranas pueden adaptarse a los compuestos que deseen.

Sin embargo, uno de los grandes problemas a los que se enfrentan las membranas es el ensuciamiento. Al ser tan selectivas, cuando estas trabajan con aguas o disoluciones que implican un gran contenido de coloides, las membranas se colmatan y taponan, lo que implica el uso de nuevas membranas. Con el fin de apostar por la economía circular y la sostenibilidad, cada vez se opta más por la regeneración de membranas [2]. A través de limpiezas químicas concretas, se puede conseguir la degradación controlada de la capa activa de una membrana, consiguiendo así su regeneración a un nivel menos selectivo. De esta forma, estas membranas regeneradas pueden utilizarse en los mismos ámbitos que muchas membranas de ultrafiltración (UF) nuevas, las cuales exigen requerimientos técnicos más ligeros [3,4].

Otra manera de apostar por la economía circular es optando por la revalorización de residuos, como podría ser la algarroba. La algarroba, aunque cuenta con grandes propiedades, es utilizada en la mayoría de los casos como alimento para los caballos,

sin investigar los posibles subproductos que podrían extraerse de este fruto. Uno de los posibles subproductos de la algarroba son los polifenoles, compuestos presentes en muchos frutos y que tienen una amplia utilidad en muchas industrias como pueden ser la farmacéutica o la cosmética [5]. Con la tecnología de separación por membranas, podrían tratarse los polifenoles presentes en la algarroba, de tal forma que puedan separarse, purificarse y utilizarse en otras industrias.

El objetivo del presente trabajo es el tratamiento de algarrobas con un sistema de membranas en serie, de tal forma que se puedan extraer los polifenoles presentes en dichas algarrobas. Dichos polifenoles son caracterizados a través de las técnicas analíticas de polifenoles totales (TPC) y del contenido de glucosa equivalente (TSC).

El sistema de membranas ideado consta de distintas etapas en las que se combinan membranas de distintas geometrías y materiales que, al combinarlas, den como resultado un proceso más eficiente. Los objetivos principales que se persiguen con dicho sistema de membranas son separar correctamente los polifenoles según sus distintos tamaños de molécula, y proteger las membranas más selectivas del ensuciamiento a través del uso previo de membranas de mayor tamaño molecular.

Además, se pretende utilizar en la última etapa del sistema de membranas una membrana polimérica regenerada a partir de una membrana de ósmosis inversa (OI), de tal forma que, tras la regeneración, sea capaz de trabajar en el rango de la UF. Con esta revalorización, tanto de membranas como de residuos agroalimentarios, se pretende favorecer la economía circular en este tipo de procesos industriales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder manipular correctamente los polifenoles presentes en la algarroba, se realizan extracciones sólido-líquido con una ratio de extracción 1:50. La masa de algarroba necesaria es triturada y tamizada con tal de obtener un tamaño de grano de 0.3 mm que facilite la extracción. Las extracciones se llevan a cabo mediante sistemas BATCH de 500 mL, a una temperatura de 25 °C y una agitación de 600 rpm, ambas constantes. Pasadas las 2 h, se dejan reposar las extracciones durante 15 min, y finalmente se retira el sobrenadante de dichas extracciones. Es el sobrenadante de estas extracciones el que será tratado con el sistema de membranas.

En cuanto a la regeneración de membranas llevada a cabo, se parte de unos recortes de membrana polimérica de OI y, a través de distintas limpiezas químicas, se degrada controladamente la capa activa de la membrana, de forma que esta aumente su tamaño de poro y permita trabajar en el rango de la UF. El modelo de membrana de OI utilizado es el ESPA1-2012, de la marca Hydranautics (Oceanside, E.E.U.U.). De dicha membrana se obtienen distintos recortes, los cuales pasan por las limpiezas químicas.

Las limpiezas regenerativas comienzan con un primer baño de los recortes de membrana en ácido acético glacial (CH3COOH) al 1 % de Scharlau (Sentmenat, España). Las membranas pasan 30 min sumergidas en dicha disolución y con una agitación magnética continúa de 350 rpm para un correcto contacto de la disolución con la capa activa de las membranas, y para ello, se utiliza el agitador magnético 2mag MIX 15 eco. Transcurrido este tiempo, las membranas pasan a una segunda disolución de hipoclorito sódico (NaClO) al 0.5 % de PanReac (Darmstadt, Alemania), en la cual permanece durante 10 min con la misma agitación anteriormente descrita. Al finalizar dicha limpieza, se realiza otra limpieza sin agitación con agua destilada de forma superficial. Con estos baños químicos se pretende retirar la limpieza superficial que pueda estar presente en la capa activa de la membrana.

Para finalizar la regeneración de la capa activa, se realiza un baño de los recortes en NaClO al 1 % con agitación dividido en 2 fases. La primera fase consiste en un baño de 24 h. Al finalizar el tiempo, se realiza una limpieza superficial con ácido clorhídrico (HCl) 0.1 M de PanReac (Darmstadt, Alemania). Con esta limpieza superficial, se retira la sal que todavía pueda quedar incrustada en la capa activa. Por último, se vuelven a introducir las membranas en un baño de NaClO al 1 %, pero en este caso, la membrana permanece en el baño durante 48 h. Una vez los recortes de membranas han sido regenerados, estos se caracterizan mediante la determinación de la permeabilidad hidráulica y del rechazo mediante polietilenglicol de cada uno de estos recortes.

A continuación, se idea un sistema de membranas en serie, el cual sirva para tratar las extracciones de algarroba anteriormente realizadas. Con dicho sistema, se podrían seleccionar y separar los polifenoles presentes en las extracciones según el tamaño de molécula que estos presenten. Además, el tamaño de poro de las membranas va disminuyendo a medida que las etapas del sistema avanzan. De esta forma, se consigue retirar la suciedad o partículas que puedan taponar las membranas de mayor selectividad en las primeras etapas del proceso.

En la Figura 1, se puede observar un esquema del sistema de membranas ideado. Este sistema consta de 4 fases y combina distintos materiales para una mayor eficiencia. En la primera etapa las extracciones de algarroba pasan por un filtro de hilos con un tamaño de poro de 1 µm, de tal forma que los coloides más grandes de las extracciones queden retenidos en dicho filtro. A continuación, el permeado del filtro de hilos es tratado por una membrana cerámica de 150 kDa, y, de igual forma, el permeado de esta membrana pasa a la siguiente membrana cerámica de 50 kDa. En la última etapa del sistema el permeado de la membrana de 50 kDa es tratado por la membrana polimérica anteriormente regenerada (MR), la cual cuenta con un tamaño de poro aproximado de 15 kDa.

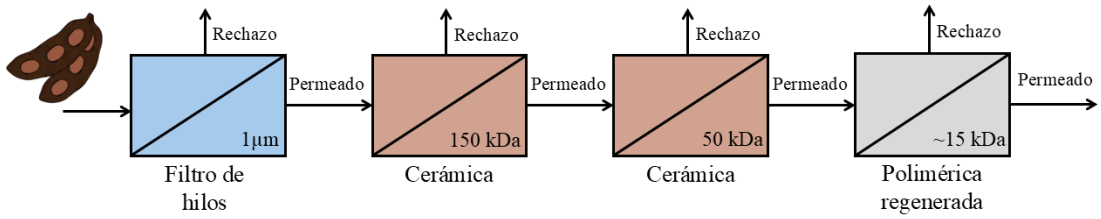



**Figura 1.** Esquema del sistema de membranas en serie.

El tratamiento de las algarrobas con el sistema de membranas se lleva a cabo en condiciones de operación constantes para todas las etapas de 20 °C, 3 bar y 4 m/s. Cuando una etapa finaliza, se toman muestras de las corrientes de rechazo y de permeado con tal de realizar una caracterización analítica de los compuestos presentes en dichas corrientes. Adicionalmente, en la etapa de la membrana polimérica regenerada, se toman muestras del permeado a distintos factores de reducción de volumen (FRV). En el caso de este estudio se toman muestras a FRV de 5, 10 y 20 %.

Por otro lado, la caracterización analítica que se realiza de las distintas corrientes consiste en la determinación del TPC y del TSC. Para el análisis de TPC de las corrientes se requiere de una muestra de 0.10 mL, a la cual se le añaden 3.40 mL de agua destilada y 0.25 mL de Folin-Ciocalteu (FCR) de Sigma-Aldrich (Darmstadt, Alemania). Esta mezcla se deja reposar en oscuridad durante 3 min, y, pasado ese tiempo, se le añaden 0.50 mL de carbonato de sodio ($Na_2CO_3$) al 20 % w/w de la marca

de PanReac (Darmstadt, Alemania). Con la mezcla final ya realizada, esta se deja una vez más en oscuridad, pero esta vez durante 1 h. Finalizado el tiempo, se mide la absorbancia de la mezcla a una longitud de onda de 765 nm, para lo cual se utiliza un espectrofotómetro ONDA V-11 SCAN (Carpi, Italia). Para poder realizar el blanco de dicha prueba, se deben seguir los pasos anteriormente descritos, con la diferencia de intercambiar la muestra por agua destilada en el mismo volumen. Todas las muestras se analizan por triplicado.

En cuanto a la caracterización de TSC, se requiere de 2 mL de muestra, a los cuales se le añaden 4 mL de antrona ($C_{14}H_{10}O$) con una concentración de 2 g/L de la marca Thermo Fisher Scientific (Ward Hill, E.E.U.U.). Dicha mezcla se introduce en el interior de un termorreactor TR 300 (Darmstadt, Alemania) a 100 °C durante 10 min. Transcurrido ese tiempo, se deja enfriar la mezcla en un baño maría con agua con hielo. Por último, se mide la absorbancia de la mezcla a una longitud de onda de 630 nm utilizando el espectrofotómetro ONDA V-11 SCAN. Al igual que en la analítica anterior, el blanco se realiza intercambiando el volumen de muestra por agua destilada y se analizan por triplicado las muestras.

## RESULTADOS

La regeneración de membranas se llevó a cabo en 3 retales de membrana de OI diferentes con tal de comprobar la reproducibilidad del proceso regenerativo. Al finalizar se determinó la permeabilidad hidráulica a través de la diferencia de masa del flujo de permeado. En cambio, el rechazó se determinó para dos tamaños moleculares distintos, de 6 y 20 kDa. Para ello, se realizaron ambas disoluciones al 2 % w/w.

En la Tabla 1 se pueden observar los datos obtenidos en la caracterización de las membranas. La permeabilidad hidráulica presentó valores similares, todos ellos dentro del rango de 25 a 35 $L/m^2 \cdot h \cdot bar$. En cuanto al rechazo, también se obtuvieron valores similares entre los 3 recortes, de alrededor del 80 % de rechazo en el tamaño molecular de 6 kDa y del 100 % de rechazo para el tamaño molecular de 20 kDa. Estos resultados obtenidos en el rechazo reflejan un tamaño de poro inferior a los 20 kDa, pero superior a los 6 kDa, por lo que se estima un tamaño de poro de aproximadamente 15 kDa.

**Tabla 1.** Resultados de la caracterización de membranas regeneradas.

| Recorte de membrana | Permeabilidad ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$) | Rechazo 6 kDa (%) | Rechazo 20 kDa (%) |
|---|---|---|---|
| MR-1 | 27.06 | 82.35 | 100 |
| MR-2 | 32.66 | 78.79 | 89.47 |
| MR-3 | 25.21 | 89.66 | 100 |

En el sistema de membranas en serie, se utilizó en la última etapa del proceso la membrana regenerada MR-1, ya que es el recorte de membrana que presenta un valor intermedio en la permeabilidad hidráulica. Con la membrana seleccionada, se procede al tratamiento de las extracciones de algarroba con dicho sistema.

En la Figura 2, se pueden observar los resultados de la analítica de TPC, más concretamente, las concentraciones de tirosol equivalentes (TyE) presentes en cada una de las corrientes de rechazo y permeado del sistema. En el primer filtro de hilos, se puede observar como las concentraciones permanecen iguales en el rechazo y el

permeado, por lo que dicho filtro no afecta en la selectividad del tirosol. En cambio, en las siguientes membranas sí se obtienen concentraciones distintas en el rechazo y el permeado. En especial destaca la membrana de 50 kDa, donde hay un salto en la concentración de aproximadamente 1750 mg TyE/L entre el rechazo y el permeado. En las últimas etapas del sistema se puede observar como la mayoría de los polifenoles tratados se acumulan en el rechazo de las membranas, mientras que en el permeado van quedando aquellos de menor tamaño. Por último, en la membrana regenerada se han obtenido en el permeado los polifenoles de menor tamaño, los cuales son los de mayor interés para la industria.

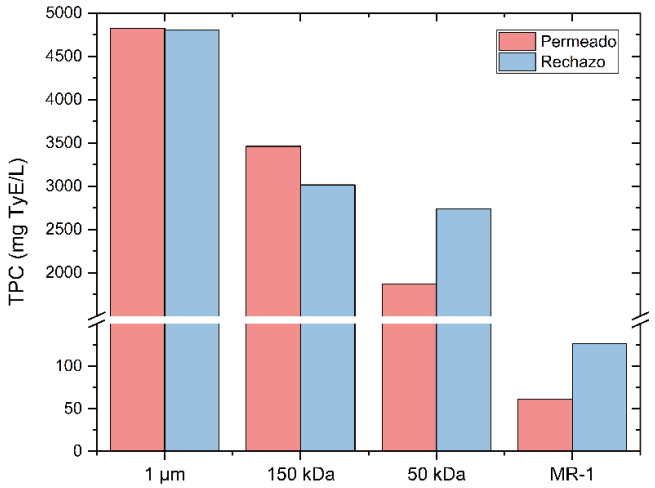



**Figura 2.** Resultados de la concentración de tirosol en las distintas etapas del sistema de membranas.

En la Figura 3, se observan los resultados de la analítica de TSC, más concretamente, las concentraciones de glucosa equivalentes (GE) presentes en cada una de las corrientes de rechazo y permeado del sistema. La concentración de azúcares ha ido variando drásticamente, tanto entre el rechazo y el permeado, como entre las distintas etapas del sistema de membranas. Esto pueden deberse a una repolimerización de los azúcares con los polifenoles aún presentes en dichas corrientes [6].

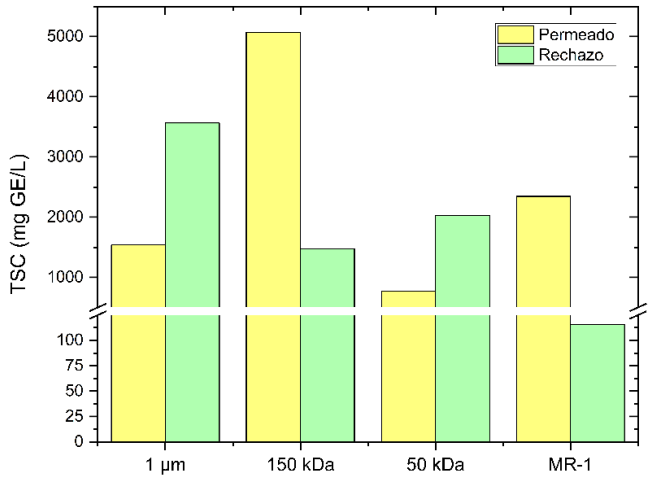



**Figura 3.** Resultados de la concentración de azúcares en las distintas etapas del sistema de membranas.

## CONCLUSIONES

Las membranas regeneradas presentan permeabilidades y rechazos que permiten clasificar los recortes en el rango de UF, en los valores más inferiores de dicho rango. Por lo tanto, es óptimo utilizar dichos recortes en el sistema en serie de membranas, ya que, al utilizarlo en la etapa final de dicho sistema, se obtiene valores más afinados y concretos de los polifenoles obtenidos.

Por otra parte, los polifenoles tratados con el sistema de membranas se quedan en su mayoría en el rechazo del sistema, mientras que aquellos de menor tamaño permanecen en las corrientes de permeado y van pasando a las siguientes etapas del sistema. En cambio, los azúcares presentan distintos picos de concentración debido a su posible repolimerización.

## REFERENCIAS

[1] Alonso-Vázquez, P.; Valle, C.; Sánchez-Arévalo, C.; Cuartas-Uribe, B.E.; Vincent-Vela, M. C.; Bes-Piá, A.; Álvarez-Blanco, S. (2024). “Separation of phenolic compounds from canned mandarin production wastewater by ultrafiltration and nanofiltration”. *Journal of Water Process Engineering*. v. 59, n. 105041. https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2024.105041.

[2] Tian, C.; Chen, J.; Bai, Z.; Wang, X.; Dai, R.; Wang, Z. (2023). “Recycling of end-of-life polymeric membranes for water treatment: Closing the loop”. In *Journal of Membrane Science Letters.* v. 3. n. 2. https://doi.org/10.1016/j.memlet.2023.100063

[3] Song, Z; Chen, R.; Luo, S.; Yu, W.; Yuan, J.; Lin, F.; Wang, M.; Cao, X.; Liao, I.; Huang, B.; You, X. (2024). “Regenerated cellulose membranes for efficient separation of organic mixtures”. *Separation and Purification Technology*, v. 328, n. 125118. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125118

[4] Nguyen Thi; H. Y.; Kim, S.; Duy Nguyen, B. T.; Lim, D.; Kumar, S.; Lee, H.; Szekely, G.; Kim, J. F. (2022). “Closing the sustainable life cycle loop of membrane technology via a cellulose biomass platform”. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. *10*, n. 7, p.p. 2532-2544. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08554

[5] Aires, A. (2022). “Polyphenols applications in pharmaceutic and cosmetic industries”, Technologies to Recover Polyphenols from AgroFood By-Products and Wastes. p.p. 337–357. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85273-9.00009-0.

[6] Marshall, J. (Ed.). (2012). “Mechanisms of saccharide polymerization and depolymerization”. Lugar de publicación: United Kingdom, London. Editado por: J. John Marshall. ISBN: 0-12-474150-9

# Modelos de ARIMA doble estacional para la predicción en el sector eléctrico

**Trull, Oscar[(1)], García-Díaz, Juan Carlos [(1)], Peiró-Signes, Angel[(2)], Segarra-Oña, Marival[(2)]**

*(1) Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de València (otrull@eio.upv.es, juagardi@eio.upv.es)*

*(2) Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València (anpeisig@omp.upv.es,maseo@omp.upv.es)*

## RESUMEN

La predicción de demanda eléctrica supone un paso fundamental en la determinación del sistema operativo eléctrico de un país. En España, Red Eléctrica de España se encarga de realizar predicciones de demanda que ayudarán a consolidar los precios de la energía, así como el plan operativo y funcional de las unidades.

El objeto de este trabajo es aportar una nueva visión de metodología de predicción utilizando modelos ARIMA doble estacionales. La aplicación de más de una estacionalidad permite a los modelos capturar no sólo el patrón diario que ocurre, sino también el patrón semanal.

Estos modelos son aplicados a diferentes periodos de demanda horaria agregada en España para comprobar la efectividad de los modelos.

El modelo desarrollado incorpora estacional múltiple y se evalúa sobre datos históricos reales de la serie de demanda horaria en España mediante métricas estándar de error predictivo como RMSE y MAPE.

**Palabras clave:** Predicción de demanda, DSARIMA, Series temporales, Estacionalidad múltiple, Demanda horaria.

## INTRODUCCIÓN

La predicción de la demanda eléctrica constituye uno de los principales problemas operativos en los sistemas eléctricos europeos modernos debido a su impacto directo en la planificación energética, el despacho de generación y la estabilidad de la red. Los operadores de transmisión (TSO) como Red Eléctrica de España (REE) necesitan disponer de previsiones fiables resulta para garantizar el equilibrio instantáneo entre generación y consumo, y para que el mercado eléctrico pueda realizar las ofertas de producción y consumo[1].

Las series temporales asociadas al consumo eléctrico presentan características estadísticas complejas, entre las que destacan la fuerte autocorrelación temporal, y la coexistencia de múltiples patrones estacionales [2]. En particular, la demanda eléctrica horaria suele presentar simultáneamente ciclos diarios e intra-semanales. Los modelos ARIMA convencionales, limitados a trabajar con una única estacionalidad, o con la necesidad de desestacionalizar para realizar predicciones, pierden información que se alberga en esta segunda estacionalidad.

La autocorrelación en series de demanda eléctrica se caracteriza por un decaimiento lento en los valores de la función de autocorrelación (ACF), indicando que la serie posee

una estructura persistente con dependencias que se extienden a lo largo de múltiples períodos de tiempo. En particular, la demanda eléctrica horaria suele presentar simultáneamente ciclos diarios e intra-semanales [3]. Estas múltiples estacionalidades interactuantes incluyen ciclos intra-día (reflejando ritmos de actividad humana), variaciones intra-semana (distinguiendo entre días laborales y fines de semana) y ciclos anuales (coincidiendo con factores climáticos y económicos).

Ante la demanda de los operadores del sistema por producir predicciones más acertadas, teniendo en cuenta las características propias de las series de demanda eléctrica, Taylor (2003) presentó los modelos de Holt-Winters doblemente estacionales (DSHW). En este trabajo, se realiza la comparativa con los modelos ARIMA doble estacionales (DSARIMA). El estudio comparativo entre los modelos de predicción univariantes para la demanda eléctrica reveló la eficacia de realizar predicciones con múltiples estacionalidades [4], [5].

El presente trabajo propone la aplicación de modelos ARIMA doble estacionales para la predicción de demanda eléctrica horaria en el entorno operativo de REE. El trabajo se organiza en una Sección 2 donde se muestra la revisión bibliográfica respecto del tema; la Sección 3 presenta el modelo y la Sección 4 analiza el resultado. Finalmente, la Sección 5 enumera las conclusiones alcanzadas al respecto.

## METODOLOGÍA

El modelo ARIMA Doble Estacional (también conocido como SARIMA doble estacional o multiplicativo de doble estacionalidad) constituye una extensión del modelo ARIMA clásico de Box-Jenkins [6] en la que se capturan varios patrones estacionales de forma simultánea. Esta metodología es particularmente relevante para series que exhiben múltiples ciclos periódicos, como la demanda eléctrica horaria que presenta simultáneamente ciclos intradiarios (intra-day) e intra-semanales (intra-weekly).

### Modelos ARIMA doble estacionales

El modelo ARIMA estacional multiplicativo, conocido también como SARIMA, incorpora términos estacionales, quedando el modelo [7]:

$$ARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$$

donde $p,d,q$ representan el orden de la parte regular AR, I, y MA, respectivamente. $P,D,Q$ son los órdenes de la parte estacional SAR, SI y SMA. La variable $s$ representa el período estacional. La ecuación del modelo SARIMA multiplicativo se expresa como:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)\nabla^d\nabla_s^D X_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t$$

en la que $\varphi_p(B)$ es el polinomio autorregresivo no-estacional y $\Phi_p(B^s)$ es el polinomio autorregresivo estacional. $\theta_q(B)$ y $\Theta_q(B^s)$ son los polinomios para la media móvil regular y estacional, respectivamente. Los operadores $\nabla^{\mathrm{d}}$ y $\nabla^{\mathrm{sD}}$ son los operadores diferencia y diferencia estacional.

El modelo DSARIMA [8] extiende el SARIMA simple para incorporar dos períodos estacionales $s_1$ y $s_2$:

$$ARIMA(p,d,q) \times (P_1,D_1,Q_1)_{s_1} \times (P_2,D_2,Q_2)_{s_2}$$

La ecuación matemática del modelo doble estacional multiplicativo es:

$$\phi_p(B)\Phi_{P_1}(B^{s_1})\Phi_{P_2}(B^{s_2})\nabla^d\nabla_{s_1}^{D_1}\nabla_{s_2}^{D_2}X_t = \theta_q(B)\Theta_{Q_1}(B^{s_1})\Theta_{Q_2}(B^{s_2})\varepsilon_t$$

donde los polinomios característicos $\Phi_p(B^s)$ y $\theta_q(B^s)$ se desglosa ahora en $\Phi_{P_1}(B^{s_1})$ y $\Phi_{P_2}(B^{s_2})$ para la parte autorregresiva, y $\Theta_{Q_1}(B^{s_1})$ y $\Theta_{Q_2}(B^{s_2})$ para la parte de media móvil.

Esta estructura puede realizarse tanto de forma multiplicativa como aditiva, dependiendo del interés del predictor por un modelo u otro. El paso de una a otra es inmediato mediante logaritmos.

**Demanda eléctrica horaria en España**

REE es el operador único del sistema de transmisión eléctrica en la Península Ibérica. Sus responsabilidades operacionales incluyen la gestión de la demanda en tiempo real, la coordinación de generadores, la planificación de infraestructura en la transmisión eléctrica, y la operación del mercado eléctrico [9].

La serie de demanda eléctrica horaria en España se caracteriza por registrar 24 observaciones diarias de demanda eléctrica, resultando en 8,760 observaciones por año de datos continuos sin interrupciones. Esta alta frecuencia temporal permite capturar dinámicas intra-diarias e intra-semanales, con periodicidades $s_1 = 24$ y $s_2 = 168$.

El conjunto de datos abarca desde el 2 de julio de 2007 hasta el 10 de octubre de 2022. En la Figura 1 se observa una ventana de la distribución de la serie en 8 semanas.

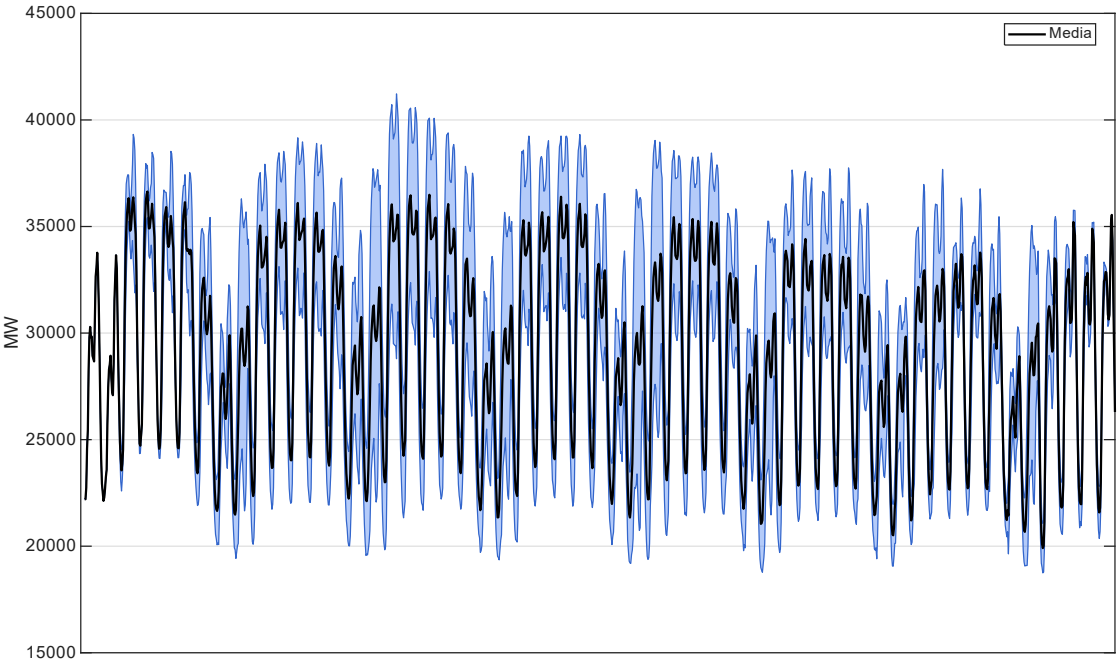



**Figura 1.** Distribución de la serie de demanda eléctrica. Distribución realizada con 100 muestras de aleatorias de 8 semanas.

**Metodología empleada**

Con el fin de comprobar la capacidad predictiva del modelo DSARIMA, el estudio emplea un marco de validación cruzada basado en ventanas deslizantes (rolling window cross-validation) aplicados a series de demanda eléctrica horaria.

La metodología se estructura en cuatro fases principales:

- Muestreo de Ventanas Temporales: Selección aleatoria de 100 muestras de ventanas de 10 semanas dentro de la muestra.
- Particionamiento de Datos: División de cada ventana en conjunto de entrenamiento y validación, de modo que se reservan dos semanas para la validación de las predicciones.
- Identificación y Ajuste de Modelo: Búsqueda automática de especificación DSARIMA óptima en cada una de las ventanas seleccionadas.
- Evaluación Comparativa: Pronósticos con métrica Rolling MAPE y Rolling RMSE

$$MAPE(h) = \frac{1}{h}\sum_{j=1}^{h}\left|\frac{y_{t+j} - \hat{y}_{t+j}}{y_{t+j}}\right| \cdot 100\%$$

$$RMSE(h) = \frac{1}{h}\sum_{j=1}^{h}\left(y_{t+j} - \hat{y}_{t+j}\right)^2$$

donde $h$ es el horizonte de predicción, $y_{t+h}$ es el valor observado en el conjunto de validación, e $\hat{y}_{t+h}$ es el valor predicho por el modelo. La utilización del MAPE en la evaluación de la predicción de demanda eléctrica es muy habitual, ya que expresa los errores en promedio porcentual.

## RESULTADOS

Se presenta en Tabla 1 el desempeño de pronósticos DSARIMA según horizonte temporal, mostrando evolución de MAPE y RMSE desde 1 hora hasta 24 horas adelante.

**Tabla 1.** Media de las métricas obtenidas en las predicciones.

| Horizonte | MAPE(%) | desv(%) | RMSE | desv. |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,9084 | 0,1142 | 269,1 | 154,4 |
| 12 | 2,3785 | 0,8541 | 735,9 | 495,6 |
| 24 | 2,4015 | 1,0374 | 735,9 | 533,8 |
| media | 2,1391 | 0,7346 | 660 | 443,3 |

El resultado muestra como el MAPE para la predicción a una hora en adelante es inferior al 1% con una desviación del 0,11%, mientras que para 24 horas en adelante este valor se fija en un 2,4%. Son resultados muy positivos, dada que se han tomado valores de forma aleatoria en la serie que incluyen sus singularidades. El valor de la desviación estándar alcanza un nivel del 1%, pero, no obstante, sigue siendo con valores muy positivos. Esta precisión en las predicciones se corrobora también con el RMSE obtenido.

La Figura 2 representa la evolución del MAPE de acuerdo al horizonte de predicción, que ayuda a comprender el comportamiento del MAPE.

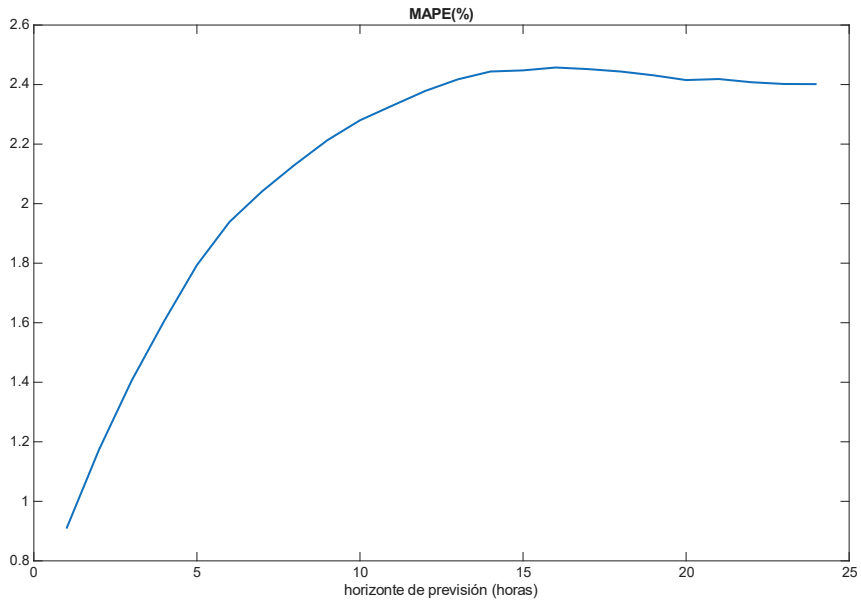



**Figura 2.** MAPE de la validación cruzada en las prediciones.

La degradación de la predicción se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta MAPE}{\Delta h} = \frac{2{,}4015\% - 0{,}9084\%}{24} = 0{,}0622\%$$

Esta degradación gradual es consistente y aumenta de forma monotónica con el horizonte de predicción. Este resultado mejora el de otros trabajos como el 3,5% de MAPE de [9] y está al mismo nivel que el 2% de MAPE de [5].

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la utilización de modelos ARIMA doble estacionales para la predicción de demanda eléctrica horaria en España. La aplicación a diferentes ventanas aleatorias de la serie en los periodos entre 2007 y 2022 muestra unos resultados de precisión en la predicción de alrededor del 2,1% en MAPE.

Esto demuestra la efectividad de la utilización de estos modelos para series temporales de estas características, con marcada estacionalidad. Los valores obtenidos en este trabajo son muy positivos, y son extrapolables a otras series de demanda eléctrica en otros países.

## REFERENCIAS

[1] Kazmi, Hussain; Tao, Zhenmin (2022). "How good are TSO load and renewable generation forecasts: Learning curves, challenges, and the road ahead". *Applied Energy*, v. 323, p.p. 119565. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119565

[2] De Livera, Alysha M.; Hyndman, Rob J.; Snyder, Ralph D. (2011). "Forecasting time series with complex seasonal patterns using exponential smoothing". *Journal of the American Statistical Association*, v. 106, n. 496, p.p. 1513-1527. https://doi.org/10.1198/jasa.2011.tm09771

[3] Gould, Peter G.; Koehler, Anne B.; Ord, J. Keith; Snyder, Ralph D.; Hyndman, Rob J.; Vahid-Araghi, Farshid (2008). "Forecasting time series with multiple seasonal patterns".

*European Journal of Operational Research*, v. 191, n. 1, p.p. 207-222. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.024

[4] Taylor, James W.; McSharry, Patrick E. (2017). "Univariate Methods for Short-Term Load Forecasting". *Advances in Electric Power and Energy Systems: Load and Price Forecasting*. Hoboken: Wiley. Editado por: Mohamed E. El-Hawary, p.p. 17-40. https://doi.org/10.1002/9781119260295.ch2

[5] García-Díaz, J. Carlos; Trull, Óscar (2016). "Competitive Models for the Spanish Short-Term Electricity Demand Forecasting". *Time Series Analysis and Forecasting*. Cham: Springer. Editado por: Ignacio Rojas y Héctor Pomares, p.p. 217-231. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28725-6_17

[6] Brockwell, Peter J.; Davis, Richard A. (2016). *Introduction to Time Series and Forecasting*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978 3 319 29852 8; ISBN online: 978 3 319 29854 2. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29854-2

[7] Box, George E. P.; Jenkins, Gwilym M.; Reinsel, Gregory C.; Ljung, Greta M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Hoboken: John Wiley & Sons. 5ª ed. ISBN: 978 1 118 67502 1.

[8] Taylor, James W.; McSharry, Patrick E. (2017). "Univariate Methods for Short-Term Load Forecasting". *Advances in Electric Power and Energy Systems: Load and Price Forecasting*. Hoboken: Wiley. Editado por: Mohamed E. El-Hawary, p.p. 17-40. https://doi.org/10.1002/9781119260295.ch2

[9] Cancelo, José Ramón; Espasa, Antoni; Grafe, Rosmarie (2008). "Forecasting the electricity load from one day to one week ahead for the Spanish system operator". *International Journal of Forecasting*, v. 24, n. 4, p.p. 588-602. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2008.07.005

# La problemática emergente del final de vida de las palas eólicas

**Climent-Fuentes, Inmaculada[1]; Montava-Jordà, Sergi[2]; Rivero Jordá, Julio Esteban[1]; Oliver Borrachero, Bernardo Antonio[2]**

*(1) Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, ic.climentfuentes@iseacv.gva.es, jerivjor@epsa.upv.es*

*(2) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, sermonjo@mcm.upv.es, berolbor@epsa.upv.es*

## RESUMEN

La energía eólica se ha consolidado como una de las principales fuentes renovables para la transición energética. Sin embargo, el aumento de la capacidad instalada ha generado un problema emergente asociado al final de vida de los aerogeneradores, especialmente en el caso de las palas fabricadas mediante materiales compuestos termoestables, cuya reciclabilidad resulta limitada.

En este trabajo se presenta una actividad de ciencia ciudadana orientada a alumnado de secundaria, bachillerato y universidad con el objetivo de aumentar la concienciación sobre la problemática del reciclaje de palas eólicas y las posibles soluciones basadas en economía circular y nuevos materiales sostenibles.

La actividad se apoya en una maqueta didáctica de un aerogenerador NREL-5-MW fabricada mediante impresión 3D y en una comparación dimensional con un Airbus A340-300 para facilitar la comprensión de la escala real de estos componentes. Asimismo, se propone una encuesta digital mediante código QR para evaluar la percepción del alumnado tras la actividad.

Se espera que este tipo de iniciativas favorezcan la divulgación de los retos asociados a las energías renovables y fomenten el interés por la sostenibilidad y la ingeniería de materiales.

**Palabras clave**: energía eólica, materiales compuestos, reciclaje, economía circular, ciencia ciudadana, sostenibilidad.

## INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos energéticos sostenibles ha impulsado un crecimiento significativo de las energías renovables durante las últimas décadas. Entre ellas, la energía eólica se ha consolidado como una de las principales fuentes de generación eléctrica renovable a nivel mundial debido a su elevada eficiencia y a la reducción progresiva de costes de instalación y mantenimiento. El desarrollo tecnológico de los aerogeneradores ha permitido incrementar notablemente la potencia generada mediante el uso de rotores de gran diámetro y palas cada vez más largas. Actualmente, algunos aerogeneradores offshore superan diámetros de rotor de más de 200 metros y emplean palas de dimensiones comparables a aeronaves comerciales.

No obstante, este crecimiento plantea nuevos retos asociados al final de vida de los aerogeneradores. La vida útil típica de estas instalaciones se sitúa entre 20 y 25 años, tras los cuales deben ser reemplazadas o sometidas a procesos de repotenciación. Como consecuencia, durante las próximas décadas se producirá un incremento significativo de residuos procedentes de palas eólicas. Las palas están fabricadas principalmente mediante materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio o fibra de carbono y matrices poliméricas termoestables, materiales que ofrecen excelentes propiedades mecánicas y elevada resistencia a fatiga, pero que presentan importantes limitaciones de reciclaje. Diversos estudios estiman que los residuos acumulados de palas podrían superar los 40 millones de toneladas a nivel mundial en 2050 [2], convirtiéndose en uno de los principales retos ambientales asociados a las energías renovables.

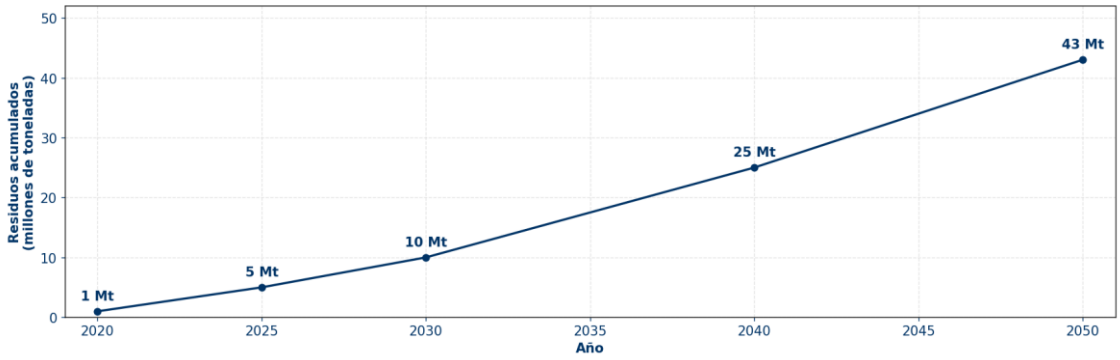



**Figura 1.** Proyección del crecimiento de residuos acumulados de palas de aerogeneradores hasta 2050. Fuente: Adaptado de Liu & Barlow (2017) [2].

En este contexto, además del desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje y materiales sostenibles, resulta fundamental aumentar la concienciación social sobre esta problemática. Las actividades de ciencia ciudadana y divulgación científica permiten acercar estos desafíos tecnológicos a estudiantes y sociedad, fomentando el interés por la sostenibilidad y la ingeniería.

## PROBLEMÁTICA DEL RECICLAJE DE LAS PALAS EÓLICAS

Los aerogeneradores modernos están compuestos por diversos materiales estructurales. Mientras que componentes metálicos como la torre o determinados elementos mecánicos pueden reciclarse con relativa facilidad, las palas representan el principal desafío ambiental al final de su vida útil.

Las palas eólicas se fabrican principalmente mediante materiales compuestos termoestables reforzados con fibra de vidrio (GFRP) o fibra de carbono (CFRP), materiales que presentan excelentes propiedades mecánicas pero importantes dificultades de reciclaje [1; 5]. Estos materiales presentan ventajas fundamentales:

- elevada resistencia específica.
- buena resistencia a fatiga.
- bajo peso.
- elevada rigidez estructural.

Sin embargo, las matrices termoestables utilizadas generan estructuras reticuladas permanentes que dificultan enormemente el reciclaje mediante métodos convencionales.

Actualmente, las principales estrategias de gestión incluyen:

- reciclaje mecánico.
- pirólisis y reciclaje térmico.
- reutilización estructural.
- valorización energética.

A pesar de los avances existentes, todavía no se dispone de una solución universalmente implantada para el reciclaje eficiente de palas eólicas a gran escala.

Paralelamente, numerosos grupos de investigación están desarrollando nuevos materiales basados en:

- matrices termoplásticas reciclables.
- fibras naturales.
- resinas bio.
- materiales biodegradables.

Estas alternativas pretenden mejorar la sostenibilidad futura de los aerogeneradores y facilitar su integración dentro de modelos de economía circular [4].

## MAGNITUD DEL PROBLEMA: DIMENSIÓN REAL DE LAS PALAS

Uno de los principales problemas detectados durante actividades divulgativas relacionadas con energía eólica es la dificultad de los participantes para visualizar la escala real de las palas eólicas modernas. Con el objetivo de facilitar esta comprensión, durante la actividad se propone comparar una pala del aerogenerador NREL-5-MW (diámetro de rotor: 126 m; altura de torre: 90 m; longitud de pala: aproximadamente 61.5 m) con una aeronave comercial Airbus A340-300 (una envergadura de alas de aproximadamente 60.3 m).

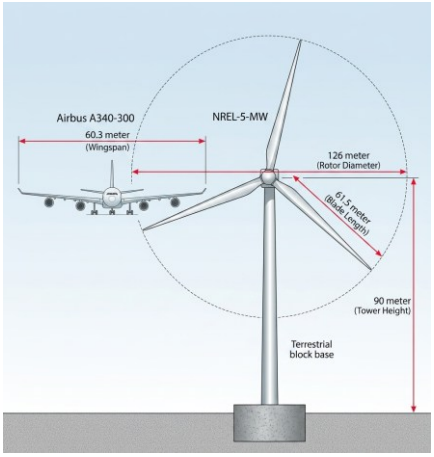



**Figura 2.** Comparativa dimensional entre el aerogenerador NREL-5-MW y un Airbus A340-300.

La comparativa de la Figura 2, similar a la que se realizó por la empresa Siemens con la presentación de un prototipo de 6 MW frente a un Airbus A380 [3], permite mostrar que una única pala eólica moderna puede alcanzar dimensiones equivalentes a la envergadura de un avión comercial de gran tamaño, facilitando la comprensión del enorme volumen de residuos que se generará al final de la vida útil de estos sistemas.

Además, esta aproximación visual resulta especialmente útil en actividades educativas orientadas a alumnado preuniversitario.

## ACTIVIDAD DE CIENCIA CIUDADANA

### Diseño de la actividad

La actividad se ha diseñado para ser desarrollada en institutos y centros educativos mediante una metodología participativa basada en aprendizaje activo.

La sesión se estructura en tres bloques principales:

- Introducción a la energía eólica (funcionamiento básico de aerogeneradores, componentes principales, transformación de energía).
- Problemática ambiental (reciclaje de palas, materiales compuestos, crecimiento de residuos).
- Soluciones sostenibles (reciclaje de composites, reutilización estructural, nuevos biomateriales).

### Maqueta didáctica

Como soporte educativo se ha desarrollado una maqueta de aerogenerador mediante impresión 3D en PLA como se puede apreciar en la Figura 3.

La maqueta incluye:

- torre desmontable.
- rotor funcional.
- palas intercambiables.
- pequeño sistema de generación de energía mecánica (solar y con batería).

Esta herramienta permite ilustrar:

- funcionamiento del sistema.
- conversión de energía mecánica en eléctrica.
- materiales utilizados en aerogeneradores reales.

Además, se incorpora una comparación visual a escala entre la pala del aerogenerador y el Airbus A340-300.



**Figura 3.** Maqueta impresa en 3D de un aerogenerador NREL-5-MW y un Airbus A340-300.

### Encuesta mediante código QR

Al finalizar la actividad, los participantes responden una breve encuesta digital accesible mediante código QR.

La encuesta permite evaluar:

- conocimientos previos.
- percepción del problema ambiental.
- interés por sostenibilidad.
- valoración de la actividad.

La utilización del código QR facilita una recogida rápida de datos y aumenta la participación del alumnado.

## RESULTADOS ESPERADOS

La actividad de ciencia ciudadana presentada se encuentra actualmente en fase de desarrollo e implementación en centros educativos. En esta etapa se están ultimando los recursos didácticos, incluyendo la maqueta impresa en 3D y la herramienta de evaluación mediante encuesta digital accesible a través de código QR.

La recogida y análisis de datos derivados de la participación del alumnado permitirán evaluar el impacto de la actividad sobre la comprensión de la energía eólica, la percepción de los problemas asociados al reciclaje de las palas y el interés por la sostenibilidad y la economía circular.

Se espera que la actividad contribuya a:

- mejorar la comprensión sobre el funcionamiento de la energía eólica.
- aumentar la concienciación acerca de los retos asociados al final de vida de las palas fabricadas con materiales compuestos.
- fomentar el interés por la sostenibilidad, la economía circular y la ingeniería de materiales.

- acercar la investigación universitaria a la sociedad mediante actividades participativas de divulgación científica.

Asimismo, la comparación dimensional entre las palas eólicas y aeronaves comerciales pretende facilitar la comprensión de la magnitud del problema y generar un mayor impacto visual entre los participantes.

## CONCLUSIONES

El crecimiento de la energía eólica plantea importantes retos asociados al reciclaje de materiales compuestos utilizados en palas de aerogeneradores. Aunque la energía eólica se percibe generalmente como una tecnología completamente limpia, el problema asociado al final de vida de las palas continúa siendo poco conocido por gran parte de la sociedad [2; 4].

La actividad de ciencia ciudadana desarrollada constituye una herramienta educativa con potencial para aumentar la concienciación social sobre esta problemática y fomentar el interés por soluciones sostenibles basadas en economía circular y nuevos materiales. La implementación actualmente en curso permitirá evaluar su eficacia como recurso de divulgación científica y sensibilización ambiental.

El uso de maquetas didácticas impresas en 3D y herramientas digitales como encuestas mediante código QR favorece la participación activa y mejora la comprensión de conceptos complejos relacionados con sostenibilidad e ingeniería de materiales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por la Universitat Politècnica de València a través del proyecto PAID-06-24 “Materiales compuestos biodegradables con resinas bio y fibras naturales de bambú para la fabricación sostenible y circular de palas de turbinas eólicas”.

## REFERENCIAS

[1] Chen, J., Wang, J., & Ni, A. (2019). Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 38 n. 12, p.p. 567-577. https://doi.org/10.1177/0731684419833470

[2] Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, v. 62, p.p. 229-240. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007

[3] Martínez, A. (s.f.). Las palas de aerogeneradores más grandes que un Airbus A380. Desenchufados. https://desenchufados.net/las-palas-de-aerogeneradores-mas-grandes-que-un-airbus-a380/ iniciada en 05/05/2026

[4] Mishnaevsky Jr, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. *Materials*, v. 14, n. 5, p.p. 1124. https://doi.org/10.3390/ma14051124

[5] Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in materials science*, v. 72, p.p. 61-99. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004

# Fabricación aditiva sostenible aplicada a prototipos eólicos: procedimiento de limpieza y recuperación de boquillas FDM

**DeLaCalle-Salas, Alejandro[(1)], Montava-Jorda, Sergi[(2)], Climent-Fuentes, Inmaculada[(3)], Parres García, Francisco José[(1)]**

*(1) Instituto de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, aldel14a@epsa.upv.es, fraparga@dimm.upv.es*
*(2) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, sermonjo@mcm.upv.es*
*(3) Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, ic.climentfuentes@iseacv.gva.es*

## RESUMEN

Los bio-composites han evolucionado como una respuesta tecnológica y ambiental frente al uso de materiales convencionales de origen fósil. Estos compuestos combinan matrices poliméricas biodegradables como el PLA, PHB, o almidones termoplásticos, con refuerzos naturales como fibras de lino, cáñamo o residuos agroindustriales. Su desarrollo ha sido impulsado por la necesidad de soluciones sostenibles en sectores como automoción, embalaje, construcción y diseño de productos.

La impresión 3D se presenta como un método de fabricación que puede emplear este tipo de bio-composites de forma flexible para generar geometrías complejas. Además, uno de sus puntos fuertes es la democratización para el acceso a la fabricación digital, puesto que tiene unos costes que son asumibles para la ciudadanía. Sin embargo, un mal mantenimiento puede reducir la vida útil de las impresoras 3D y, en concreto, la de las boquillas. En este trabajo se presenta un resumen de las posibilidades para realizar el mantenimiento, así como una solución híbrida alternativa a las habituales para conseguir optimizar la mejora.

**Palabras clave**: bio-composites, PLA, fibras naturales, impresión 3D, FDM, mantenimiento, boquilla, sostenibilidad, diseño circular.

## INTRODUCCIÓN

Los compuestos reforzados con fibras naturales (NFRPC) han emergido como sustitutos sostenibles de los composites convencionales reforzados con fibra de vidrio o carbono. Fibras como kenaf, lino, yute, cáñamo o palma son ampliamente valoradas por su bajo impacto ambiental y bajo coste que, sin embargo, permite obtener propiedades nada despreciables [1, 2].

Los bio-composites representan una solución técnica y ecológica con un papel estratégico dentro de la economía circular. Han experimentado una evolución positiva en propiedades funcionales y aplicaciones industriales, aunque su adopción masiva dependerá de la superación de retos en durabilidad, coste y estandarización. La combinación de innovación tecnológica, impulso regulatorio y ecodiseño será clave para su consolidación como material del futuro.

El desarrollo futuro se orienta pues al uso de bio-composites híbridos que combinen fibras naturales con matrices recicladas, favoreciendo la reutilización y la segunda vida de los materiales, en el marco de una economía sostenible y circular.

En demasiadas ocasiones, la ciencia resulta un mundo algo alejado de la ciudadanía, de forma que esta no entiende cómo funciona, ni tampoco es capaz de valorar el aporte que da a la sociedad. Por este motivo, surge la idea de ciencia ciudadana, con el objeto de acercar a la sociedad el método científico y sus resultados. Una sociedad que entiende y valora debidamente la ciencia es menos propensa a caer en la desinformación y la irracionalidad que, desgraciadamente, está a la orden del día. Por ello, los científicos tienen la obligación moral de acercar sus progresos a la sociedad y, de hecho, ya se recoge como una actividad valorable e incluso exigida en el ámbito de los proyectos financiados con dinero público, como es el caso.

La actividad que se escogió en el ámbito de este proyecto fue la creación de una maqueta en impresión 3D de un aerogenerador junto con un avión de pasajeros a escala, con el fin de explicar a estudiantes de instituto y centros educativos los componentes de un aerogenerador y realizar una comparativa visual a escala entre la pala del aerogenerador y el avión, así como la problemática ambiental y soluciones sostenibles con el uso de bio-composites.



**Figura 1.** Maqueta aerogenerador NREL-5-MW y un Airbus A340-300.

La impresión 3D es una tecnología democratizadora, que ayuda mucho a acercar la ciencia a la gente, especialmente a los más jóvenes, en el ámbito de proyectos STEM. Sin embargo, como cualquier máquina, puede llegar a dar problemas, y esto puede suponer un impedimento para su uso ya que, si no se consigue solucionar de forma relativamente rápida, o si se da un problema de forma bastante recurrente, esto puede provocar un desdén tanto en alumnado como en profesorado, que desemboque en un abandono de la tecnología [3].

Durante la realización de las piezas, surgió un problema que es bastante habitual en el mundo de la impresión 3D, y este es la limpieza y mantenimiento de boquillas. Si no se

realizan correctamente, pueden obstruirse, y suelen ser uno de los primeros motivos por los que estas máquinas comienzan a fallar. Por ello, se decidió realizar un análisis de las principales soluciones a este problema, para llegar a aquella que sea más adecuada con el enfoque puesto en las posibilidades de un instituto.

## OBJETIVOS

Los principales objeticos del presente trabajo son:

- Analizar los métodos más comunes para limpiar las boquillas para impresión 3D.
- Idear un método de limpieza más sencillo y realizable en el ámbito de un instituto.

## DESARROLLO

### Impresión 3D FDM

La impresión 3D FDM es una tecnología de fabricación aditiva que permite producir piezas de geometría compleja. Consiste en la extrusión controlada de materiales, principalmente poliméricos, a través de una boquilla, para generar la pieza capa a capa.

Las boquillas, con el paso del tiempo, van acumulando residuos provenientes de la degradación de los polímeros que pasan a su través. Esto perjudica al flujo de la boquilla, y es especialmente grave si afecta al propio orificio de apertura; hay que tener en cuenta que el estándar es de 0.4 mm de diámetro.

Permite emplear materiales poliméricos con cargas y refuerzos como, por ejemplo, las fibras naturales, la fibra de carbono, o la de vidrio. El uso de este tipo de materiales puede producir atascos y problemas de extrusión de forma temprana. De hecho, de entrada, no se recomienda utilizar estos materiales con boquillas de diámetro inferior a 0.6 mm, precisamente por su viscosidad y su tendencia a atoramientos. El origen de los atascos puede ser de diferente tipo:

- Térmico: por la degradación de los polímeros [4], especialmente si se producen sobrecalentamientos del material por una configuración inadecuada.
- Mecánico: por atascos debido a acumulaciones de fibra u otros residuos.
- Operativo: por cambios de material mal ejecutados, presencia de humedad en el filamento, o por fusión del material fuera de la punta de la boquilla.

Para poder reducir la cantidad de problemas relacionados con estos materiales, es fundamental realizar un mantenimiento preventivo puesto que, pasado un cierto límite, la recuperación de las boquillas se convierte en una tarea ardua, que no compensa frente a la opción de adquirir unas nuevas, con el coste que ello conlleva.

### Métodos de limpieza de boquillas

Existen varias formas de limpiar boquillas, entre las que se encuentran: realización de purgas, uso de agujas y barrenas, tirón en frío, limpieza térmica, ultrasonidos, y disolventes.

- La purga es el método más sencillo y tradicional. Consiste en hacer pasar un polímero que arrastre al anterior, llevándose con él los restos. Este polímero ha de tener una viscosidad relativamente alta para poder arrastrar mejor, y su

temperatura de trabajo ha de permitir llegar y superar a la del polímero a limpiar. De otra forma, no conseguiría fundir los restos del anterior. La realización de purgas es algo que los propios sistemas de las impresoras cada vez tienen más automatizado, y es especialmente necesario cuando se realiza un cambio de material. En cualquier caso, para aquella suciedad interna que se haya creado, no es un método de gran efectividad; su principal propósito es limpiar la boquilla del material anterior.

- Otro método bastante empleado es el uso de barrenas y agujas. Estos se emplean, por lo general, cuando ya ha tenido lugar el atasco. Mientas que la aguja limpia el orificio de salida, la barrena permite empujar el filamento que se haya podido quedar atascado antes de la salida.
- El tirón en frío (del inglés, *cold pull*) es una de las mejores soluciones. Su principio de funcionamiento es el siguiente: se hace pasar un filamento, que puede ser el mismo que se ha empleado, y se deja enfriar la boquilla a temperatura ambiente. En ese momento, se tira de él con fuerza, de forma que tanto la suciedad como los restos de material anterior se quedan pegadas al filamento. Esto se repite tantas veces como sea necesario, hasta ver que la punta del filamento sale limpia. El principal problema de este método es que, al hacerse esta fuerza en una impresora, la estructura mecánica sufre, especialmente los ejes XY. Además, si el filamento es frágil, puede que se rompa antes de conseguir sacarlo. Esto se puede solucionar en ocasiones aumentando ligeramente la temperatura por encima de la de transición vítrea, antes de realizar el tirón. Otro problema que suele haber es que el tirón se ha de hacer desde una posición incómoda para el usuario [5].
- La limpieza térmica por degradación suele ser la última opción. Consiste en someter la boquilla a un calentamiento prolongado por encima de la temperatura de degradación del polímero empleado, carbonizando todos los restos que pueda haber en el interior. Aunque permite recuperar las boquillas, no termina de limpiar estos restos, de forma que las paredes del interior continúan teniendo partículas carbonizadas. Además, no funciona bien cuando hay restos de fibras de carbono o de vidrio, o cualquier otra carga que tenga puntos de fusión mucho más elevados que los del polímero.
- Los ultrasonidos son una opción complementaria al resto. No permite quitar grandes restos, pero es capaz de eliminar de las paredes la capa carbonizada que se va quedando con el tiempo. No obstante, si la boquilla es demasiado larga, este método puede no ser efectivo, al no poder llegar a zonas demasiado escondidas.
- Finalmente, queda la opción de los disolventes. Todos los termoplásticos tienen algún disolvente conocido, que se puede emplear para eliminar los restos de polímero. Sin embargo, esto no suele ser de gran utilidad, puesto que el principal problema son los restos degradados, que no se suelen ver afectados por el mismo disolvente. Además, el uso de disolventes puede resultar peligroso a la hora de manejarse, además de que presenta riesgos y problemas medioambientales.

Es evidente que los últimos tres métodos pueden resultar engorrosos, caros, e incluso peligrosos, por lo que no son los más adecuados para un ambiente estudiantil. De esta forma, la solución ha de pasar por alguna de las tres primeras opciones. A modo de resumen, se presenta la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de los diferentes tipos de limpieza de boquillas.

| Método | Dificultad | Pros | Contras |
|---|---|---|---|
| Purga | Fácil | Sencillez | Poco efectivo |
| Aguja/barrena | Media | Sencillez | No limpia los residuos de la pared |
| Tirón en frío | Media | Método más efectivo | Puede dañar la mecánica |
| Limpieza térmica | Difícil | Elimina cualquier resto de plástico | Genera residuos degradados |
| Ultrasonidos | Media | Elimina suciedad incrustada | Poco efectivo |
| Disolventes | Difícil | Disuelve polímeros específicos, temperatura ambiente | Peligroso y costoso |

## Solución

En vista de todos los pros y contras, se propone una solución: la creación de un sistema para realizar un tirón en frío fuera de la impresora 3D. Este sistema consiste en un pequeño bloque calefactor con una resistencia y un termopar, anclado a un bastidor que permite estirar del filamento de forma cómoda y adecuada, sin afectar al sistema de movimiento de la impresora 3D. Adicionalmente, se puede emplear para realizar limpiezas por aguja y barrena de forma también más efectiva y cómoda para el usuario. Siguiendo con la economía circular, este sistema se puede emplear simplemente aprovechando bloques calefactores de otras impresoras antiguas.

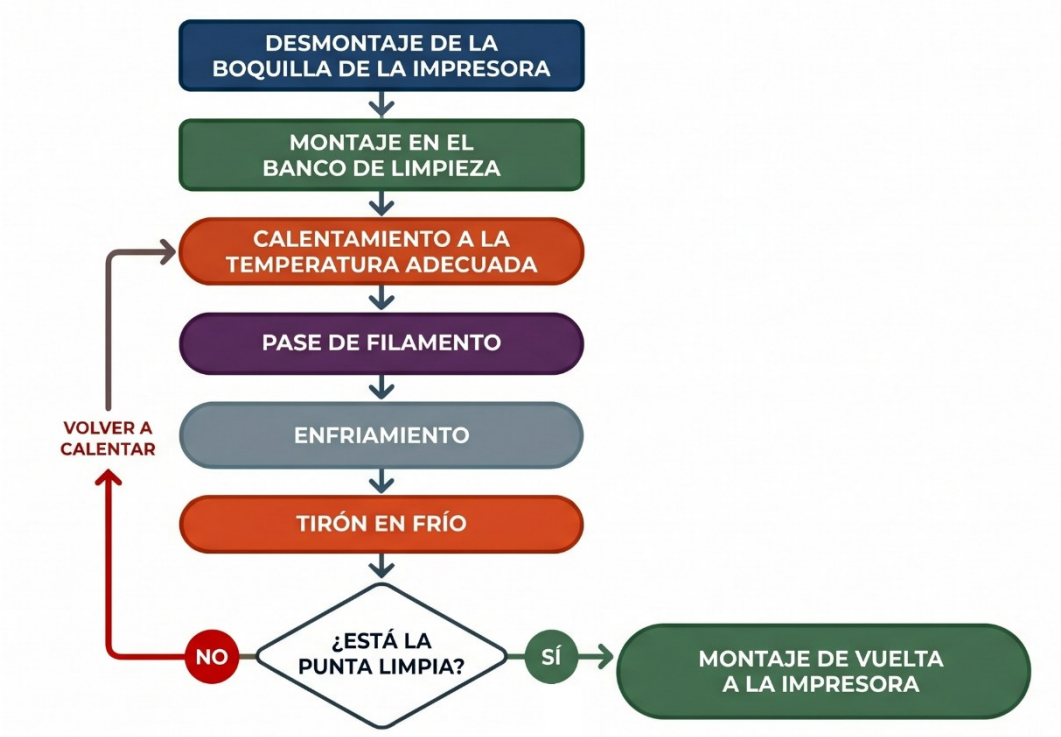



**Figura 2.** Diagrama del proceso de limpieza propuesto.

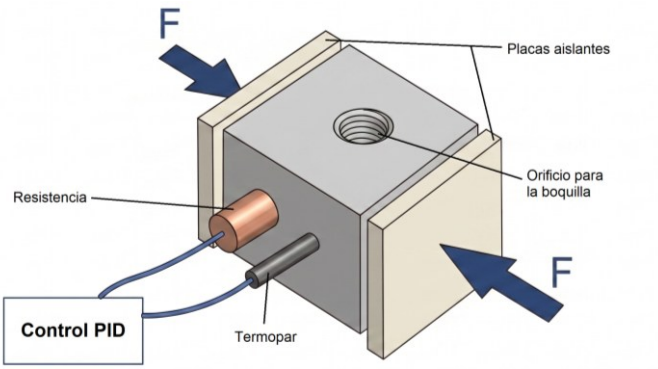



**Figura 3.** Esquema del sistema de limpieza ideado.

## CONCLUSIONES

La impresión 3D es una tecnología democratizadora que permite el acercamiento de la ciencia a la sociedad. En este caso, da una puerta de acceso para transmitir la importancia y beneficios del uso de bio-composites en el marco de una economía circular. Para asegurar que el alumnado y el profesorado puedan usar fácilmente esta tecnología, es fundamental establecer un método para mantener las boquillas limpias y en orden. La propuesta llevada a cabo es la de establecer un sistema externo para realizar un tirón en frío, que resulta la más adecuada tanto por sencillez como por eficacia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por la Universitat Politècnica de València a través del proyecto PAID-06-24 “Materiales compuestos biodegradables con resinas bio y fibras naturales de bambú para la fabricación sostenible y circular de palas de turbinas eólicas”.

## REFERENCIAS

[1] Dhakar, Krishnakant; *et al.* (2024). “Extraction of bamboo fibre and its incorporation into bio composites: a study”. *Materials and Manufacturing Processes.* v. 40, n. 2; p.p. 162-178. https://doi.org/10.1080/10426914.2024.2406784

[2] Chichane, Assia; *et al.* (2024). "Towards a green & ecological revolution: Review of natural reinforcing bio-composites and bio-hybrid composites". *Polymers and Polymer Composites*, v. 32, n. 3. https://doi.org/10.1177/09673911241226578

*[3]* Mensley, Matthew. *Just Unboxed a 3D Printer? The Honest Guide to Avoiding ‘Hobby Burnout’. https://all3dp.com/4/just-unboxed-a-3d-printer-the-honest-guide-to-avoiding-hobby-burnout/*

[4] Kervran, Mael; *et al*. (2022). “Thermal degradation of polylactic acid (PLA)/polyhydroxybutyrate (PHB) blends: A systematic review”. *Polymer Degradation and Stability*, v. 201. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109995

[5] Issal, Alexander. *3D Printer Cold Pull: How to Do It. https://all3dp.com/2/3d-printer-clogged-nozzle-how-to-perform-a-cold-atomic-pull/*

# Comparación de la experiencia de compra física y digital en tienda deportiva monomarca: implicaciones para la satisfacción y fidelización del consumidor

**Rodríguez Blasco, Alejandro(1), Yumayusa Castro, Andrés Felipe(2), Gutiérrez Zuñiga, María Juliana(3), Mondéjar-Verdú, Esther(4)**

*(1) Universitat Politècnica de València (España), arodbla@epsa.upv.es*

*(2) Universitat Politècnica de València (España), andres.yumayusac@gmail.com*

*(3) Universidad Sergio Arboleda (Colombia),* Mariaju.gutierrez@usa.edu.es

*(4) Universitat Politècnica de València (España), esmonver@upv.es*

## RESUMEN

Este artículo sintetiza un Trabajo Fin de Máster orientado a comparar la experiencia de compra física y digital en la marca Adidas, analizando su impacto en la satisfacción y la fidelización del consumidor. Se emplea un enfoque mixto que integra técnicas de neuromarketing (eye tracking, GSR y EEG) con instrumentos declarativos (encuestas y entrevistas), permitiendo contrastar la percepción consciente con la respuesta no consciente. El objetivo es identificar qué elementos del entorno de compra (tienda física vs. app/web) captan mayor atención, generan mayor activación emocional y se asocian con una evaluación más positiva de la marca. Los hallazgos sugieren diferencias en jerarquía visual, esfuerzo cognitivo y percepción de comodidad y confianza entre canales, ofreciendo recomendaciones para optimizar la experiencia omnicanal.

**Palabras clave:** Adidas; experiencia de compra; omnicanalidad; neuromarketing; eye tracking; satisfacción; fidelización.

## INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento del consumidor ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, incorporando aportes de la neurociencia cognitiva con el fin de comprender los procesos inconscientes que influyen en la toma de decisiones. Diversas investigaciones han demostrado que una parte mayoritaria de las decisiones humanas se produce de manera no consciente, influenciada por emociones, memoria y atención [1, 2]. En este contexto, el neuromarketing surge como una disciplina que integra conocimientos de la neurociencia, la psicología y el marketing para analizar la respuesta del individuo frente a estímulos comerciales [3].

### Experiencia de compra y economía conductual

La experiencia de compra puede interpretarse como un proceso de toma de decisiones bajo información imperfecta. En el entorno digital, la limitación sensorial incrementa la dependencia de heurísticos (como el precio, las reseñas o la disponibilidad), mientras que en el canal físico la validación táctil y visual reduce la incertidumbre. La teoría de la utilidad percibida sugiere que la satisfacción emerge de la comparación entre las expectativas previas y el desempeño real del canal. En entornos altamente saturados, el sistema intuitivo y automático adquiere un papel predominante, aumentando la probabilidad de fatiga cognitiva, errores de decisión y estrés del consumidor [2].

## Omnicanalidad y consistencia de marca

La omnicanalidad no implica solo la presencia en múltiples canales, sino su integración absoluta mediante los mismos beneficios, códigos visuales, mensajes y políticas. La inconsistencia —como promociones distintas, catálogos divergentes o devoluciones complejas— eleva el esfuerzo cognitivo del usuario y erosiona la confianza en la marca. Los modelos de *customer journey* proponen mapear los puntos de dolor (*pain points*) y los momentos de verdad (*moments of truth*) para priorizar mejoras de diseño.

ZARA, como referente global de la moda rápida, ha construido su ventaja competitiva a partir de la variedad y la inmediatez [5]. Sin embargo, esta estrategia genera una elevada densidad visual en tienda y en su plataforma digital, lo que genera una sobrecarga que afecta negativamente la experiencia del usuario, la percepción de orden y el control del proceso de compra [6].

## Variables de experiencia de usuario relevantes

Desde la perspectiva de la experiencia de usuario (UX), los espacios comerciales deben concebirse como entornos de interacción donde el diseño y la jerarquía visual influyen directamente en la comodidad y la eficiencia [7]. En la investigación de UX se consideran determinantes la eficacia (capacidad de completar tareas), la eficiencia (tiempo y esfuerzo invertido), la satisfacción (valoración subjetiva posterior), la confianza (seguridad y claridad) y el disfrute (componente hedónico). En aplicaciones de *retail*, la arquitectura de la información, la claridad en la guía de tallas y la transparencia en los costes son predictores clave de la conversión.

## Métricas biométricas en entornos comerciales

El neuromarketing aplicado a UX evalúa cómo los estímulos visuales y las decisiones de interfaz influyen en la atención y la emoción. El uso del *eye tracking* permite identificar patrones de atención visual, áreas de interés (AOI) y recorridos perceptivos, infiriendo tanto el procesamiento temprano como el sostenido [8]. Por otro lado, la respuesta galvánica de la piel (GSR) mide los cambios en la conductancia cutánea regulados por el sistema nervioso autónomo, reflejando estados de activación fisiológica como el estrés, la frustración o la excitación. Finalmente, la electroencefalografía (EEG) aporta indicadores objetivos de carga cognitiva y atención sostenida, resultando idónea para identificar la fricción y la sobrecarga informativa en interfaces complejas.

## Metodología experimental

La investigación adopta un enfoque experimental y descriptivo basado en un diseño mixto con triangulación. La muestra estuvo compuesta por 10 participantes (70% mujeres y 30% hombres, de entre 18 y 45 años), pertenecientes a un nivel socioeconómico medio-alto y seleccionados mediante un filtro previo (*screener*) de afinidad por la compra frecuente de moda.

El protocolo experimental comenzó con una fase de bienvenida, contextualización y firma del consentimiento informado. Posteriormente, se procedió a la colocación y calibración de los dispositivos (*eye tracker*, GSR y EEG), verificando la calidad de la señal y estableciendo un periodo basal de comparación. Durante la fase central, los participantes realizaron tareas realistas y equivalentes en los escenarios físico y digital de ZARA (búsqueda de un producto específico, comparación de modelos, consulta de

tallas y revisión del proceso de pago). Se registraron eventos clave para alinear las métricas fisiológicas con los momentos del *journey* del consumidor. Al finalizar, se retiraron los sensores y se aplicaron encuestas y entrevistas breves para contrastar los datos biométricos con las respuestas declarativas de los usuarios.

Tabla 1. Diseño del estudio y variables registradas.

| Componente | Instrumento/técnica | Variables principales |
|---|---|---|
| Atención visual | Eye tracking | Fijaciones, tiempo de mirada, AOI, mapas de calor, recorridos |
| Respuesta emocional | GSR | Activación, picos por estímulo, variación por canal |
| Carga cognitiva | EEG | Indicadores de esfuerzo/atención sostenida, variaciones por tarea |
| Percepción | Encuesta + entrevista | Satisfacción, confianza, facilidad, intención de recompra |

## OBJETIVOS

Objetivo general: comparar la experiencia de compra física y digital (app/web) de Adidas y evaluar su relación con satisfacción y fidelización.

Objetivos específicos: (1) identificar elementos que captan atención visual en cada canal; (2) estimar diferencias en activación emocional y esfuerzo cognitivo; (3) contrastar respuesta implícita y declarativa; y (4) proponer recomendaciones para mejorar la experiencia omnicanal.

## RESULTADOS

***Comparación del recorrido de compra.*** En el canal digital, el recorrido tiende a ser lineal y orientado a completar tareas (búsqueda–selección–pago), mientras que en el canal físico aparecen recorridos exploratorios (mirada, toque, comparación in situ). Esta diferencia se refleja en la distribución de fijaciones: en digital predominan los elementos funcionales (menús, filtros, CTA), y en físico predominan estímulos sensoriales (material, color, disposición, iluminación).

***Confianza y percepción de riesgo.*** La confianza se asocia en digital a la claridad de información (tallas, devoluciones, stock, método de pago) y a señales de seguridad. Los participantes tienden a incrementar el tiempo de fijación y la carga cognitiva cuando existe ambigüedad (p. ej., dudas sobre disponibilidad o pasos del checkout). En físico,

el riesgo percibido se reduce por la validación directa del producto y la presencia de personal, lo que se traduce en menor fricción cognitiva durante el cierre de compra.

***Elementos que impulsan fidelización.*** La fidelización se relaciona con la consistencia entre canales: cuando el usuario reconoce en la app los mismos códigos visuales, promociones y beneficios que en tienda, aumenta la percepción de coherencia de marca. Asimismo, la personalización (recomendaciones relevantes, historial) y la rapidez en devoluciones refuerzan la intención de recompra.

***Lectura integrada de métricas.*** La triangulación sugiere que una interfaz con demasiadas opciones puede elevar la carga cognitiva (EEG) y, simultáneamente, generar picos de activación (GSR) no necesariamente positivos. Por ello, se interpreta que la activación debe contextualizarse con indicadores de fricción: no toda activación implica preferencia; puede reflejar estrés o incertidumbre.

Los resultados se organizan por fuente de datos y por comparación entre canales. En atención visual, el canal digital muestra una jerarquía clara hacia elementos de acción (CTA, compra, filtros) y precio, mientras que el canal físico concentra atención en displays y producto. Los patrones de fijación sugieren que en digital la rapidez de decisión se apoya en heurísticos de precio y disponibilidad, mientras que en físico el contexto sensorial favorece exploración.

En activación emocional (GSR), se observan incrementos ante promociones, lanzamientos o señales de urgencia tanto en digital como en físico, aunque en digital los picos se asocian también a momentos de fricción (registro, pasos de pago). La carga cognitiva (EEG) tiende a elevarse en tareas digitales cuando la interfaz presenta demasiadas opciones o rutas, mientras que en físico se incrementa en zonas de alta densidad visual o señalética confusa.

Las encuestas muestran que la satisfacción se vincula con facilidad de navegación y claridad de información en digital, y con disponibilidad de producto y ambiente en físico. La intención de fidelización aumenta cuando el usuario percibe coherencia entre canales, confianza en el proceso de pago y sensación de control sobre la compra.

Tabla 2. Síntesis de hallazgos por fuente de datos. Fuente: elaboración propia.

| Fuente de datos | Hallazgo clave | Implicación |
|---|---|---|
| Eye tracking | Digital: foco en CTA/precio; Físico: foco en producto/display. | Optimizar jerarquía visual y consistencia entre canales. |
| GSR | Picos ante promoción y ante fricción en checkout digital. | Reducir fricción y evitar sobrecarga en momentos críticos. |
| EEG | Mayor esfuerzo cognitivo con demasiadas opciones en digital. | Simplificar rutas y priorizar información esencial. |
| Encuestas | Satisfacción ligada a facilidad + confianza; fidelización a coherencia omnicanal. | Diseñar journey integrado y transparente. |

Figura 1. Evidencia visual del experimento (captura/heatmap). Fuente: elaboración propia.

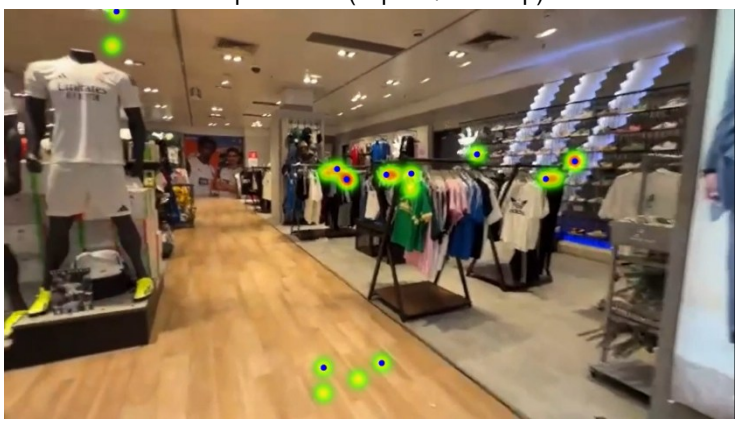


Figura 2. Evidencia visual del experimento (captura/heatmap). Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación respaldan que el canal digital favorece decisiones rápidas guiadas por señales de acción y precio, mientras que el canal físico permite una mayor exploración y construcción de valor experiencial. La triangulación de datos demuestra que ciertas fricciones digitales pueden no declararse explícitamente en los cuestionarios, pero se reflejan de forma objetiva en los picos de activación emocional (GSR) y en la carga cognitiva (EEG). En términos de experiencia de usuario (UX), los datos apuntan a la necesidad crítica de diseñar flujos sin fricción en los puntos de contacto clave del ecosistema digital, garantizando que la interfaz reduzca el esfuerzo mental y mantenga señales de confianza equivalentes a las del entorno presencial.

La principal aportación de este estudio es demostrar que la evaluación de una estrategia omnicanal requiere integrar de forma complementaria medidas objetivas y subjetivas. Las decisiones de diseño de interacción y de arquitectura de información en el retail no deben fundamentarse únicamente en la percepción declarada por los usuarios en encuestas poscompra, ya que la evidencia biométrica permite identificar microfricciones perceptivas y priorizar cambios con un impacto directo en la conversión y la satisfacción final del cliente.

Como recomendaciones de implementación derivadas de los resultados, se propone a corto plazo la optimización del proceso de checkout mediante la reducción de pasos redundantes, el feedback inmediato del sistema y la visibilidad de mensajes de confianza (políticas de devolución y seguridad en el pago). Asimismo, se sugiere simplificar los sistemas de menús y filtros de la aplicación e integrar los estímulos

promocionales de manera armónica para evitar la saturación informativa. A medio plazo, se vuelve indispensable reforzar la estrategia phygital mediante la integración de códigos QR en productos físicos, la consulta de disponibilidad en tiempo real y la unificación absoluta de las políticas promocionales entre canales.

Finalmente, se reconocen como limitaciones del estudio el tamaño muestral acotado y la dependencia de un protocolo de tareas específicas. Como líneas futuras de investigación, se plantea la necesidad de ampliar la muestra experimental segmentando por perfiles de comportamiento, incorporar análisis de carácter longitudinal para evaluar el efecto del aprendizaje en la interfaz y estudiar el impacto de la personalización algorítmica en la carga cognitiva y el recuerdo de marca del consumidor.

## REFERENCIAS

[1] PuroMarketing. La experiencia de compra es tan importante como el producto. https://www.puromarketing.com/14/36358/experiencia-compra-importante-como-producto

[2] Carretero, Álvaro. Adidas 2025: más sostenibilidad y DTC para rebasar la frontera de 30.000 millones en ingresos.

https://www.2playbook.com/retail/adidas-2025-mas-sostenibilidad-dtc-rebasar-frontera-30000-millones-en-ingresos_2695_102.html

[3] FRAME. WHAT'S ADIDAS DOING TO FORGE CLOSER IN-STORE CONNECTIONS BETWEEN BRAND AND CONSUMER?

https://frameweb.com/article/retail/whats-adidas-doing-to-forge-closer-in-store-connections-between-brand-and-consumer

# Viabilidad de la decoloración con ozono en residuos de denim y su efecto en la calidad de la fibra reciclada

**Mira-Cuenca, Cristina[(1)], Almuhamed, Sliman[(2)], Micó-Vicent, Bàrbara[(3)], López-Rodriguez, Daniel[(4)], Jordán-Núñez, Jorge[(3)], Aksakal, Nuray[(5)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, crimicue@edu.upv.es*

*(2) Recover Textile Systems S.L., sliman.almuhamed@recoverfiber.com*

*(3) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(4) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

*(5) Jeanologia S.L., naksakal@jeanologia.com*

## RESUMEN

Este estudio evalúa la viabilidad de blanquear residuos textiles de denim utilizando la tecnología de ozono y analiza el impacto del proceso en la calidad de la fibra reciclada resultante. Las pruebas se estructuraron en fases: una primera fase a pequeña escala para establecer el punto de partida del proceso, seguida de una etapa piloto para determinar el tamaño óptimo del lote y ajustar los parámetros de ozono, finalizando con un proceso a escala industrial que permitió el desfibrado y la caracterización de la fibra. Los resultados confirman que el ozono puede eliminar parcialmente el índigo de los residuos de denim sin clasificar, logrando tonos azul claro, pero sin alcanzar niveles de blanco o crudo comparables a las fibras naturales o blanqueadas químicamente. Aunque el proceso reduce la calidad de la fibra (principalmente por el aumento de fibras cortas y la reducción de la longitud media), la fibra final sigue manteniendo unas propiedades óptimas para el procesado industrial. El blanqueo por ozono se presenta como una alternativa viable de bajo impacto químico para la decoloración de denim.

**Palabras clave:** algodón: ozono; decoloración; denim, fibras recicladas; sostenibilidad; residuos textiles; calidad fibras.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos textiles provenientes del denim representan un porcentaje elevado de los residuos textiles de algodón. Sin embargo, la mayoría de estas fibras han sido teñidas mediante índigo o colorantes sulfurosos para obtener las características tonalidades después de aplicar los lavados. Tras el reciclado mecánico, se obtienen fibras de algodón, donde siguen estando presentes las tonalidades azules. El proceso de adopción de las fibras recicladas se ve entorpecido por el color de las fibras, que delimita a que productos pueden destinarse sin que el resultado final se vea comprometido [1].

Los métodos de blanqueo y decoloración más empleados son métodos químicos que consumen grandes cantidades de agua y productos químicos, además de debilitar las propiedades de las fibras de algodón. Sin embargo, existen otros procesos empleados en la industria textil para el blanqueo de los tejidos, como es el ozono. Los tratamientos de ozono se usan mayoritariamente en la industria del denim, para eliminar parte del colorante índigo inicial y conseguir los diferentes tonos de denim. Su uso también

destaca en el tratamiento de aguas residuales provenientes de los procesos de tintura y acabado, así como en la eliminación de colorantes reactivos [2].

## OBJETIVOS

Para ello, en estas pruebas se prevé estudiar el comportamiento de los residuos textiles del denim tras su exposición a la tecnología de ozono en diferentes condiciones, focalizándose en la eliminación del color y la preservación de sus propiedades físicas. Los objetivos específicos planteados son:

- Analizar el grado de decoloración obtenido mediante el proceso de ozono.
- Definir los parámetros óptimos para el tratamiento.
- Comparar el proceso de reciclaje mecánico entre los residuos denim originales y los residuos denim decolorados.

## MÉTODOS

Para el estudio se emplearon residuos postindustriales de denim, con composiciones variables, predominantemente basadas en algodón (aproximadamente un 95%), y con presencia de poliéster y elastano. La mezcla incluía tanto tejidos teñidos con índigo como con colorantes sulfurosos, representando un escenario industrial real.

El estudio se estructuró en tres fases:

- **Fase 1 (estudio inicial)**: ensayos a pequeña escala para determinar las condiciones de tratamiento de partida.
- **Fase 2 (optimización)**: determinar la carga óptima para el tratamiento, así como parámetros óptimos, variando la concentración de ozono y la duración del ciclo.
- **Fase 3 (validación industrial)**: aplicación de los parámetros seleccionados sobre una muestra semi-industrial (300 kg). Posterior desfibrado de material blanqueado y material original y comparativa de la calidad de fibra obtenida.

Las pruebas con tecnología de ozono se realización en las instalaciones de Jeanologia, contando con su amplia experiencia en la misma y su asesoramiento en las pruebas.

Se utilizó el equipo G2 Super, el cual toma el oxígeno del aire ambiente y lo convierte en gas de ozono. El ozono se transporta al tambor para tratar las muestras y el ozono restante se destruye y se convierte en $O_2$ limpio, sin dejar residuos que puedan dañar los productos o las personas.

Por último, para el análisis de los resultados se midieron las siguientes propiedades:

**Color y aspecto visual**

Para la medición del color, los residuos textiles se desfibraron, a nivel laboratorio en las primeras fases y a escala industrial en la última fase, para homogeneizar las muestras.

Como referencia, se emplearon dos muestras de fibra:

- Muestra origen (denim): algodón reciclado mecánicamente proveniente de residuos denim sin tratar.
- Muestra objetivo (natural): algodón reciclado mecánicamente proveniente de residuos textiles blanqueados, sin la presencia de agentes blanqueantes.

Se empleó un espectrofotómetro calibrado con Iluminante D65 y observador de 10 grados, la componente especular excluida (SCE) y mediciones en cápsula.

Se registraron las coordenadas L, a y b del espacio CIELAB de cada una de las muestras, y se utilizó como comparativa el ΔE entre las muestras y la referencia de algodón natural, para evaluar el grado de blanqueo.

Se usaron muestras de 5 gramos por prueba con 3 mediciones cada una.

**Propiedades de la fibra de algodón**

Para la caracterización de las fibras obtenidas tras el procesado mecánico, se usó un sistema Fibrotest de Textechno para la medición de los parámetros físicos:

- Longitud media (mm), longitud media del cuartil superior (UQML) (mm), fibras cortas (SFC) (%), y tenacidad (g/tex).

Además, se analizaron otros 2 parámetros característicos de la fibra reciclada:

- Neps (n/g), en número por gramo, mediante el equipo de Uster.
- Hilos sin abrir (n/g) (%), en número por gramo y porcentaje, mediante el método manual de Recover™.

## RESULTADOS

### Fase 1

En la primera fase, centrada en el análisis de los efectos del ozono en tejidos denim tintados con índigo y tintados con sulfurosos, se emplearon 4 combinaciones de tratamiento a cada uno de los tejidos, Tabla 1.

**Tabla 1.** Planteamiento primera fase

| Prueba | Cantidad (kg) | Pre-lavado | Equipo | Concentración (g/Nm³) | Duración (min) |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 5 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 25 | 30 |
| **2** | 5 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 25 | 60 |
| **3** | 5 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 40 | 30 |
| **4** | 5 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 40 | 60 |

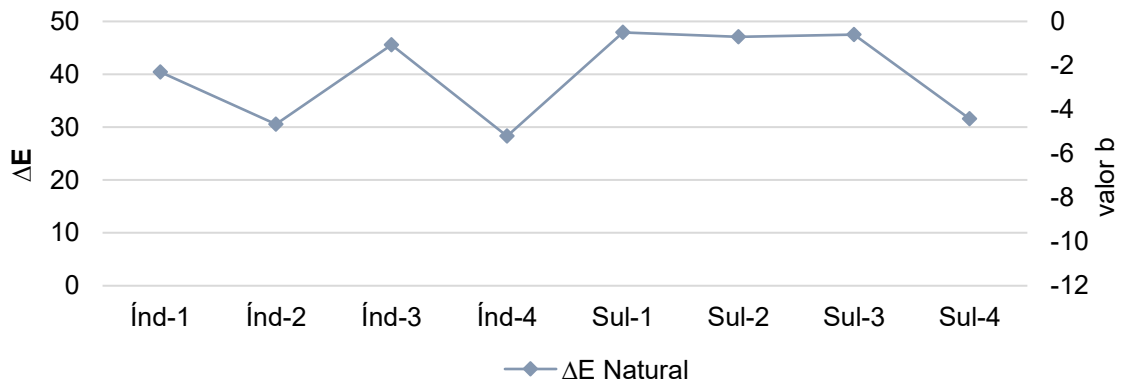



**Figura 1.** Resultados colorimétricos primera fase

En la Figura 1 se observa que el tratamiento con ozono presenta una eficacia diferenciada en función del tipo de tintura del tejido. En particular, los tejidos teñidos con índigo muestran una mayor sensibilidad al proceso de oxidación, alcanzando valores de ΔE significativamente inferiores en comparación con los tejidos sulfurosos. Este comportamiento puede atribuirse a la localización superficial del índigo en la fibra, lo que facilita su degradación por agentes oxidantes como el ozono.

En conjunto, esta fase permite definir un rango operativo inicial, identificando como factores críticos el tipo de tintura y la duración del ciclo, lo que establece la base para la optimización posterior.

**Fase 2**

Como continuación, y partiendo de los parámetros definidos en la primera fase, se incrementó la carga hasta 20 kg de residuo textil denim. El incremento de la muestra tratada provocó una disminución de la eficacia del blanqueo, evidenciando problemas de transferencia de masa y distribución no homogénea del ozono dentro del material, por lo que se ajustaron las condiciones, Tabla 2.

**Tabla *2.*** Condiciones para las pruebas de aumento de carga

| Prueba | Cantidad (kg) | Pre-lavado | Equipo | Proceso 1 | | Proceso 2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Concentración ($g/Nm^3$) | Duración (min) | Concentración ($g/Nm^3$) | Duración (min) |
| **1** | 20 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 40 | 60 | 100 | 60 |
| **2** | 20 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 100 | 60 | 100 | 30 |
| **3** | 40 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 100 | 60 | 100 | 60 |
| **4** | 60 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 100 | 60 | 100 | 60 |
| **5** | 100 | 60º C 15 min | G2 SUPER | 100 | 60 | 120 | 60 |

Se intensificó el proceso mediante el incremento de la concentración de ozono o la aplicación de tratamientos en etapas sucesivas. Sin embargo, estas estrategias conllevan un aumento del consumo energético y del impacto sobre la fibra, lo que introduce un compromiso directo entre la eficiencia del tratamiento y su viabilidad industrial.

Los resultados indican que cargas intermedias (pruebas 3 y 4) permiten alcanzar un equilibrio adecuado entre grado de decoloración y escalabilidad del proceso. Las muestras blanqueadas de las pruebas 3 y 4, se desfibraron en el laboratorio para llevar a cabo el análisis de color, Figura 2. Se observó una disminución en el ΔE del denim al natural, de un 43% para la prueba 3 y un 38% para la prueba 4, siendo comparables y logrando una tonalidad clara de la fibra de algodón denim. Dada la similitud de los resultados se escogieron las condiciones de la prueba 4 como condiciones óptimas para la fase 3.

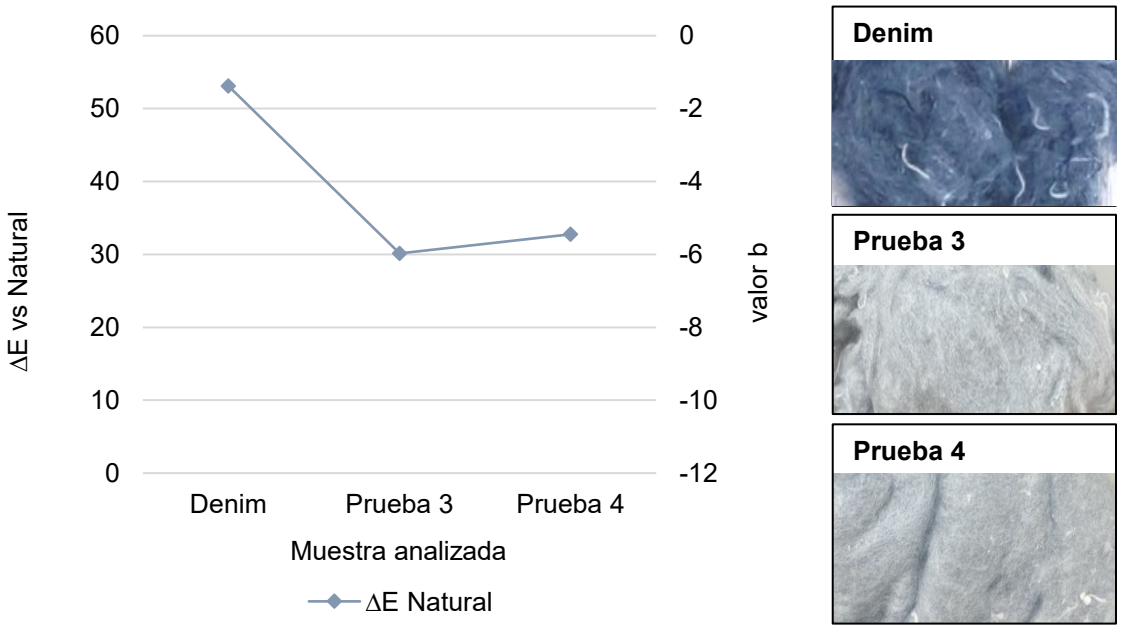



**Figura 2.** Comparativa colorimétrica y visual de las pruebas a mayor carga y la fibra denim original.

## Fase 3

En la última fase se procesaron 300 kg de residuos denim, para permitir el desfibrado industrial y análisis posterior de las características de la fibra obtenida.

Tras el tratamiento con ozono con las condiciones de la prueba 4 (fase 2), se llevó a cabo el desfibrado industrial de la materia blanqueada, así como del material original, residuos denim no blanqueados. Se usó una configuración de máquina estándar para ambas materias, sin cambios para observar el impacto de la fibra resultante tras el procesado.

La fibra de algodón reciclado se analizó posteriormente Tabla 3.

**Tabla 3.** Características de la fibra reciclada.

| Muestra | Media (mm) | SFC (%) | UQML (mm) | UI | Tenacidad (g/tex) | Elongacion (%) | Neps (n/g) | Hilos (%) | Hilos (n/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fibra denim original** | 17.5 | 25.1 | 24.1 | 76.1 | 13.3 | 14 | 329 | 12.9 | 169 |
| **Fibra denim blanqueado** | 15.2 | 36.6 | 20.7 | 74.4 | 17.4 | 8 | 252 | 5.0 | 76 |

Los resultados muestran una degradación parcial de las propiedades físicas de las fibras recicladas tras el tratamiento con ozono. Parámetros como la longitud media de las fibras o el UQML, se vieron reducidos en un 13% y 14%, respectivamente. De la misma forma, aumentó en un 46% la cantidad de fibras cortas presentes, aun así, situándose por debajo del 40%. Otros parámetros, sin embargo, se vieron beneficiados, como es el caso de los neps, reducidos en la fibra blanqueada en un 23% o la presencia de hilos sin abrir, también reducida en un 55%.

Por otro lado, del mismo modo que en fases anteriores, se analizó el color resultante de la fibra obtenida tras el desfibrado, Figura 3.

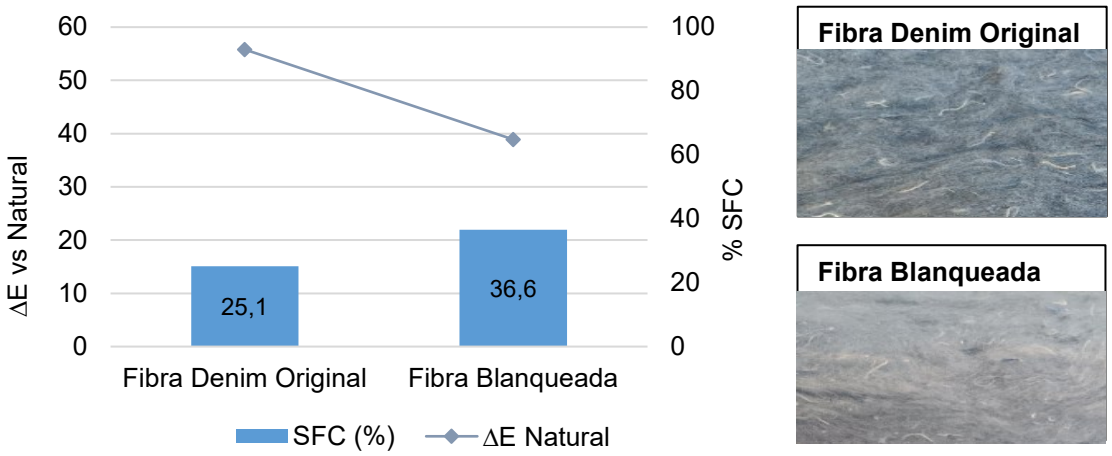



**Figura 3.** Comparativa colorimétrica y visual de las pruebas industriales.

Se observó una mejora en la diferencia de color de la fibra denim versus la fibra natural, aunque menor que en la fase 2, de un 30%, disminuyendo la tonalidad azul de la fibra original, pero sin llegar a niveles de blanco comparables con la fibra natural.

## CONCLUSIONES

El tratamiento con ozono permite reducir de forma significativa la intensidad del color en residuos denim, especialmente en materiales teñidos con índigo, aunque sin alcanzar niveles de blanco comparables a procesos químicos convencionales. Son necesarias pruebas posteriores de aplicabilidad en producto final, con el fin de evaluar si el grado de decoloración alcanzado resulta suficiente para ampliar el rango de aplicaciones de la fibra reciclada.

La carga de material y el tiempo de tratamiento se identifican como factores determinantes en el comportamiento del proceso, ya que su variación implica una modificación de las condiciones efectivas de operación. Además, en cuanto a efectos en el proceso de reciclado mecánico y características de la fibra, aunque sí existe una degradación de las fibras de algodón, esta es limitada, y se requieren estudios posteriores para evaluar su impacto real en los productos finales.

En este contexto, el tratamiento con ozono se posiciona como una estrategia prometedora dentro de las tecnologías de bajo impacto para la valorización de residuos textiles, con potencial para su integración en procesos industriales de reciclado mediante una adecuada optimización de las condiciones de operación.

## REFERENCIAS

[1] Anas, M. S., Faheem, M., & Mikucioniene, D. (2025). Challenges and Limitations in Recycling of Post-Consumer Cotton Denim Waste into New Textiles. Journal of Natural Fibers, 22(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2570080

[2] Eren, H. A., Yiğit, İ., Eren, S., & Avinc, O. (2020). Ozone: An Alternative Oxidant for Textile Applications (pp. 81–98). https://doi.org/10.1007/978-3-030-38545-3_3

# Circularidad Total Fibra a Fibra en el Sector Textil a Través de Nuevas Tecnologías de Reciclaje de Poliéster

**Pascual Bernabeu, Jose Javier[(1)], Silvestre Lloret, Concepción[(2)], Moldovan, Simona[(3)]**

*(1) Responsable Dinamización de negocio con Grandes Cuentas. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil y Cosmética, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España.*
*(2) Equipo de transferencia Ingeniería Química Aplicada. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil y Cosmética, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España. Contacto: csilvestre@aitex.es*
*(3) Equipo de Dinamización de Proyectos Europeos. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil y Cosmética, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España.*

## RESUMEN

El sector textil afronta uno de los grandes retos medioambientales actuales, debido a su modelo de producción y consumo lineal, basado en un elevado uso de recursos, altas emisiones y una creciente generación de residuos. Este problema es especialmente relevante en las fibras sintéticas, que dominan el mercado global, siendo el poliéster la más utilizada. Sin embargo, el reciclaje textil fibra a fibra sigue siendo muy limitado, lo que dificulta avanzar hacia una verdadera economía circular.

En este contexto surge el proyecto europeo LIFE POLITEX, cuyo objetivo es demostrar que es posible cerrar el ciclo del poliéster mediante tecnologías innovadoras de reciclado químico. A través de una planta piloto, el proyecto transforma residuos textiles en nuevas fibras de alta calidad, aptas para su reutilización en aplicaciones textiles exigentes.

Para lograrlo, se combinan diferentes etapas tecnológicas, como la clasificación de materiales, su análisis, la despolimerización química, la purificación de los componentes obtenidos y su posterior transformación en nuevas fibras. Además, el proyecto evalúa el impacto ambiental, económico y social del proceso, con el fin de garantizar su sostenibilidad y viabilidad a escala industrial.

**Palabras clave:** Economía circular, reciclaje químico, poliéster, circularidad fibra a fibra, residuos textiles, LIFE POLITEX.

## INTRODUCCIÓN

El modelo actual de producción y consumo del sector textil es predominantemente lineal, basado en una elevada extracción de recursos, altos consumos energéticos y una rápida generación de residuos. La consolidación del fenómeno fast fashion ha agravado esta situación, acortando el ciclo de vida de las prendas y aumentando significativamente los residuos destinados a vertedero o incineración. Como resultado, la industria textil se sitúa entre los sectores con mayor impacto ambiental a escala global [1,7].

Desde el punto de vista ambiental, el sector presenta un elevado consumo de agua y energía, además de contribuir de forma relevante a las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de microplásticos y la acumulación de residuos sólidos. En este contexto, las fibras sintéticas representan aproximadamente el 64 % de la producción mundial, siendo el poliéster el material predominante. Sin embargo, pese a la disponibilidad de distintas tecnologías, solo una pequeña fracción de los residuos textiles se recicla en nuevos productos, siendo el reciclado cerrado fibra a fibra todavía muy limitado [3,4,8].

En los últimos años, una parte importante de las estrategias de sostenibilidad del poliéster se ha basado en el uso de PET reciclado procedente de botellas. No obstante, este enfoque presenta limitaciones en términos de circularidad textil, al no reincorporar directamente residuos textiles al mismo ciclo productivo. Por ello, resulta necesario desarrollar soluciones tecnológicas capaces de valorizar residuos textiles complejos y reintroducirlos como fibras de altas prestaciones.

En este contexto, el proyecto LIFE POLITEX propone demostrar la viabilidad del reciclado químico fibra a fibra de residuos textiles de poliéster mediante una planta piloto industrial [2]. El proyecto aborda de forma integrada etapas de clasificación, preparación, despolimerización, purificación de monómeros, repolimerización e hilatura, bajo un enfoque orientado a la sostenibilidad técnica, económica y ambiental. La cadena de valor conceptual desarrollada en el proyecto se presenta en la Figura 1.




**Figura 1.** Cadena de valor de la circularidad completa fibra a fibra desarrollada en el proyecto LIFE POLITEX. Adaptado de LIFE POLITEX Grant Agreement.

## OBJETIVOS

El proyecto LIFE POLITEX tiene como objetivo general demostrar la viabilidad técnica, ambiental e industrial de un sistema integral de circularidad fibra a fibra para residuos textiles de poliéster, mediante tecnologías innovadoras de reciclado químico capaces de transformar estos residuos en nuevas fibras recicladas de altas prestaciones.

Para ello, el proyecto desarrolla y valida una estrategia industrial basada en la integración de diferentes etapas de tratamiento, desde la preparación y clasificación del residuo hasta la obtención de nuevos materiales textiles. El objetivo es avanzar hacia una circularidad cerrada dentro del propio sector textil, reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes y favoreciendo la reincorporación de los residuos en la cadena de valor.

De forma específica, los principales objetivos técnicos son:

1. Desarrollar un sistema de clasificación y acondicionamiento de residuos textiles de poliéster que garantice la pureza y homogeneidad necesarias para su reciclado químico.
2. Validar un proceso de despolimerización química para la obtención de monómeros de alta calidad, aptos para su repolimerización.
3. Evaluar la calidad del monómero mediante técnicas avanzadas de caracterización y control analítico.
4. Optimizar los procesos de repolimerización y transformación para obtener fibras textiles recicladas con propiedades adecuadas para aplicaciones exigentes.
5. Analizar la viabilidad ambiental, económica y social del sistema mediante herramientas de evaluación de sostenibilidad, favoreciendo su transferencia industrial.

## RESULTADOS

El desarrollo del proyecto LIFE POLITEX ha permitido establecer una base tecnológica sólida para la implementación de un modelo integral de circularidad fibra a fibra en residuos textiles de poliéster. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de abordar de forma coordinada las etapas clave del proceso, desde la preparación del residuo hasta la obtención de nuevas fibras recicladas. Un esquema general del modelo validado se muestra en la Figura 2.




**Figura 2.** Esquema del modelo de circularidad fibra a fibra para poliéster en el proyecto LIFE POLITEX.

En las primeras fases, se ha validado la caracterización de residuos textiles aptos para su reciclado químico, definiendo criterios de pureza y composición que garantizan una alimentación estable al proceso de despolimerización. Mediante técnicas avanzadas de análisis —incluyendo determinación de composición, propiedades térmicas, viscosidad intrínseca y caracterización estructural— se han establecido especificaciones técnicas robustas del material de entrada, asegurando su compatibilidad con las etapas posteriores. En este sentido, los resultados obtenidos indican que es necesario trabajar con corrientes de residuo con un contenido superior al 95 % en poliéster (PES) para garantizar la eficiencia del proceso.

Asimismo, se ha optimizado la etapa de acondicionamiento del residuo, mejorando parámetros como el formato, la densidad y la homogeneidad del material. Estos avances han permitido reducir la variabilidad inherente a los residuos textiles y aumentar la estabilidad y reproducibilidad del proceso de despolimerización. En particular, se ha identificado el formato aglomerado como la configuración más adecuada para favorecer una alimentación homogénea y un comportamiento estable durante el proceso. Un ejemplo del residuo textil en formato aglomerado se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Ejemplo de residuo textil en formato aglomerado utilizado como etapa de acondicionamiento previa al reciclado químico.

En relación con el reciclado químico, se ha validado la obtención de bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET) como intermediario clave para el cierre del ciclo del poliéster [3,6]. Los resultados de caracterización han permitido confirmar la pureza del monómero recuperado y su adecuación para procesos posteriores de repolimerización, así como evaluar la influencia de distintas condiciones operativas y sistemas catalíticos en el rendimiento del proceso.

Adicionalmente, se han obtenido resultados relevantes en la validación del poliéster reciclado a escala piloto, incluyendo su repolimerización e hilatura multifilamento. Estos estudios han demostrado la capacidad del material recuperado para transformarse nuevamente en fibras textiles con propiedades comparables a las requeridas en aplicaciones de alto valor añadido. La comparativa de propiedades reológicas entre el poliéster virgen y el reciclado químicamente se recoge en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Comparativa de propiedades reológicas del poliéster virgen y reciclado químicamente

| Parámetro | PES virgen | PES reciclado químicamente |
|---|---|---|
| Viscosidad intrínseca (IV) [dL/g] | 0,62 – 0,67 | 0,57 – 0,59 |
| MFI (285 °C, 2.16 kg) [g/10 min] | 80 - 88 | 90 - 100 |

Finalmente, los primeros análisis de sostenibilidad, basados en metodologías de análisis de ciclo de vida (LCA) y costes de ciclo de vida (LCC), permiten evaluar el potencial impacto ambiental, económico y social del sistema desarrollado, apoyando la viabilidad de su futura implementación industrial [5,7].

## CONCLUSIONES

El proyecto LIFE POLITEX representa una aproximación innovadora para abordar uno de los principales desafíos del sector textil: la limitada circularidad de los residuos de poliéster y la escasa implantación de modelos de reciclado cerrado fibra a fibra. Mediante un enfoque integral que combina tecnologías de clasificación, reciclado químico, recuperación de monómeros, repolimerización y transformación textil, el proyecto demuestra la viabilidad de un sistema capaz de reincorporar residuos textiles en el propio ciclo productivo.

Los resultados obtenidos confirman el potencial del enfoque desarrollado para definir requisitos técnicos del residuo de entrada, validar la obtención y calidad del monómero recuperado y permitir la producción de poliéster reciclado con capacidad de transformación en nuevas fibras textiles. Asimismo, la incorporación de herramientas de evaluación ambiental, social y económica refuerza el carácter integral del proyecto y respalda su potencial escalabilidad industrial.

En conjunto, LIFE POLITEX contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a acelerar la transición hacia una economía circular en el sector textil, promoviendo un modelo más sostenible, eficiente y alineado con los actuales retos ambientales y regulatorios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida a través del proyecto LIFE POLITEX (Grant Agreement 101148221), en el marco del programa LIFE de la Unión Europea, gestionado por CINEA.

## REFERENCIAS

[1] European Commission. EU strategy for Sustainable and Circular Textiles.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0141

[2] European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) (2024). Grant Agreement 101148221 – LIFE23-ENV-ES-LIFE POLITEX: Fibre to fibre full circularity in the textile sector through novel polyester recycling technologies.

[3] Enking, J.; Becker, A.; Schu, G.; Gausmann, M.; Cucurachi, S.; Tukker, A.; Gries, T. (2025). “Recycling processes of polyester-containing textile waste–A review”. *Resources, Conservation and Recycling*, v. *219*, p. 108256.

https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108256

[4] Silva, A. C.; Barreiros, M. P.; Azevedo, T.; Brás, D.; Teixeira, M. A.; Fangueiro, R.; Ferreira, D. P. (2026). “Fibre-to-fibre recycling in textiles: strategies, limitations and industrial perspectives”. *Textiles*, v. *6*, n. 1, p. 30.

https://doi.org/10.3390/textiles6010030

[5] Abagnato, S.; Rigamonti, L.; Grosso, M. (2024). “Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review”. *Waste Management*, v. *182*, p.p. 74-90.

https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016

[6] Andini, E.; Bhalode, P.; Gantert, E.; Sadula, S.; Vlachos, D. G. (2024). “Chemical recycling of mixed textile waste”. *Science Advances*, v. *10*, n. 27, p. eado6827.

https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6827

[7] European Environment Agency. Textiles and the environment: the role of design in Europe’s circular economy. Publications Office of the European Union.

https://data.europa.eu/doi/10.2800/578806

[8] Parnell, K.; Rolston, A.; Hilton, B.; Luccitti, A. (2025). “Circular Economy in the Textile Industry”: A Review of Technology, Practice, and Opportunity. Recycling, v. 10, n. 6, p. 225.

https://doi.org/10.3390/recycling10060225

# Aplicación del marco *Safe and Sustainable by Design* (SSbD) al desarrollo de sistemas avanzados de filtración de aire basados en nanofibras: caso de estudio del proyecto INTEGRANO

**Marco, Bruno[(1)], Pascual, Carlos[(1)], Nicosia, Alessia[(2)], Costa, Anna[(3)], Perucca, Massimo[(4)], Mantecca, Paride[(5)]**

*(1) Grupo de I+D en Salud y Sanidad Ambiental, AITEX, Carretera de Banyeres, 10 Alcoy.*
*(2) ISAC, National Research Council (CNR), Via Gobetti 101, 40129 Bologna, Italy.*
*(3) ISSMC, National Research Council (CNR), Via Granarolo 64, 48018 Faenza (RA), Italy.*
*(4) PROJECT HUB360, Corso Laghi 22, 10051 Avigliana (TO), Italy.*
*(5) Dept Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milan, Italy.*

## RESUMEN

El desarrollo de sistemas de filtración de aire basados en nanomateriales plantea importantes retos relacionados con la seguridad, la sostenibilidad y el cumplimiento normativo. En este contexto, el enfoque Safe and Sustainable by Design (SSbD) permite integrar estos aspectos desde fases tempranas del diseño.

El proyecto INTEGRANO desarrolla una metodología cuantitativa multidimensional orientada a evaluar nanomateriales en condiciones reales de ciclo de vida. En este trabajo se presenta el marco SSbD y su implementación en dicho proyecto, centrando el análisis en el caso de estudio relativo al desarrollo de filtros de aire basados en nanofibras de acetato de celulosa funcionalizadas con nanopartículas de plata.

Los resultados muestran que es posible alcanzar altos niveles de eficiencia de filtración y actividad antimicrobiana, manteniendo un equilibrio con criterios de seguridad y sostenibilidad mediante técnicas de optimización multiobjetivo.

**Palabras clave:** SSbD, nanofibras, filtración de aire, nanopartículas, sostenibilidad.

## INTRODUCCIÓN

El uso de nanomateriales en aplicaciones de filtración de aire ha experimentado un crecimiento significativo debido a su capacidad para mejorar la eficiencia de captura de partículas y añadir funcionalidades avanzadas, como la actividad antimicrobiana. Sin embargo, estas ventajas también implican retos relacionados con la posible liberación de nanopartículas, la exposición humana y el impacto ambiental.

En este contexto, la Comisión Europea ha promovido el enfoque *Safe and Sustainable by Design* (SSbD), que propone integrar criterios de seguridad, sostenibilidad y funcionalidad desde las primeras etapas del desarrollo de materiales [1]. Este enfoque requiere la evaluación simultánea de múltiples dimensiones, incluyendo toxicidad, impacto ambiental, viabilidad económica y rendimiento técnico.

El proyecto europeo INTEGRANO se enmarca en esta estrategia, desarrollando herramientas que permiten aplicar de manera operativa el enfoque SSbD a diferentes cadenas de valor industriales mediante metodologías cuantitativas integradas.

## PROYECTO INTEGRANO Y ENFOQUE METODOLÓGICO

INTEGRANO propone un enfoque basado en la integración de modelos y datos experimentales para evaluar nanomateriales en condiciones reales de ciclo de vida. La metodología se estructura en torno al concepto de *Key Design Factors* (KDFs), que definen las variables de diseño del sistema, y *Key Performance Indicators* (KPIs), que permiten evaluar su comportamiento en distintas dimensiones.

Los KPIs incluyen indicadores relacionados con la funcionalidad, como la eficiencia de filtración o la actividad antimicrobiana, así como métricas de seguridad, impacto ambiental y coste. Estos indicadores se obtienen mediante herramientas como el análisis de ciclo de vida (LCA), modelos de exposición y evaluación toxicológica.

La integración de estos resultados se realiza mediante algoritmos de optimización multiobjetivo, que permiten identificar soluciones de compromiso entre diferentes criterios. Este enfoque es especialmente relevante en sistemas complejos como los nanomateriales, donde la mejora de una propiedad puede afectar negativamente a otras dimensiones.

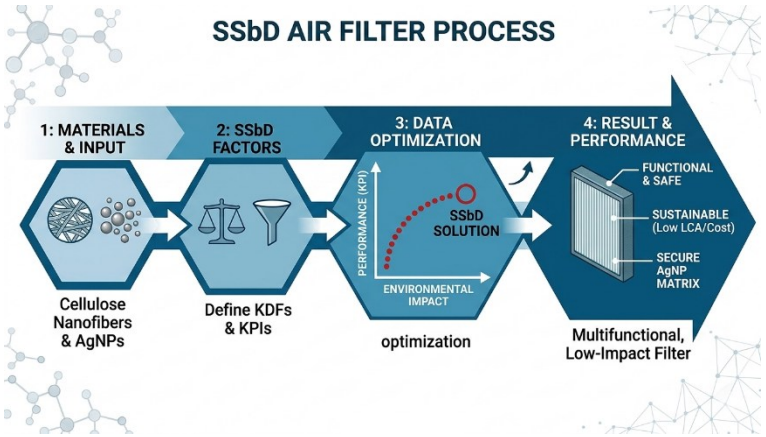



**Figura 1.** Esquema del marco SSbD aplicado en INTEGRANO para el Caso de Estudio en filtración.

## CASO DE ESTUDIO: FILTRACIÓN DE AIRE MEDIANTE NANOFIBRAS FUNCIONALIZADAS

### Descripción del sistema

El Caso de Estudio 4 (CS4) se centra en el desarrollo de sistemas de filtración de aire basados en nanofibras de acetato de celulosa (CA) obtenidas mediante electrospinning [2] y funcionalizadas con nanopartículas de plata (AgNPs). Este enfoque permite combinar alta eficiencia de filtración con propiedades antimicrobianas.

El uso de CA como matriz responde a criterios de sostenibilidad, al tratarse de un material de origen biobasado [3], mientras que la incorporación de plata permite conferir actividad bactericida frente a microorganismos relevantes [4].

Los sistemas desarrollados están diseñados para cumplir estándares de filtración equivalentes a FFP2, alcanzando eficiencias superiores al 94% para partículas finas.

### Definición de variables y estrategia SSbD

El diseño del sistema se basa en la aplicación de un enfoque DoE (*Design of Experiments*), en el que se varían parámetros clave como el gramaje de las nanofibras y la concentración de plata incorporada en la matriz polimérica [5].

Estos parámetros constituyen los KDFs principales del sistema, mientras que los KPIs considerados incluyen la eficiencia de filtración, el factor de calidad, la actividad antimicrobiana y la liberación de nanopartículas durante el uso.

Además, se incorporan indicadores de sostenibilidad como el impacto ambiental y el coste, evaluados mediante LCA y LCC.

**Tabla 1.** DoE de muestras combinando KDFs.

| Muestra | KDF1 Gramaje ($g/m^2$) | KDF2 AgNPs (%) |
|---|---|---|
| P1 | 0.50 | 0.00 |
| P2 | 7.50 | 0.00 |
| P3 | 7.50 | 0.30 |
| P4 | 0.50 | 0.30 |
| P5 | 4.00 | 0.15 |
| P6 | 1.20 | 0.24 |

### Resultados de funcionalidad y rendimiento

Los resultados muestran que todos los sistemas funcionalizados con plata, menos uno (P4), presentan eficiencias de filtración superiores al 94%, cumpliendo los requisitos establecidos para aplicaciones de protección respiratoria.

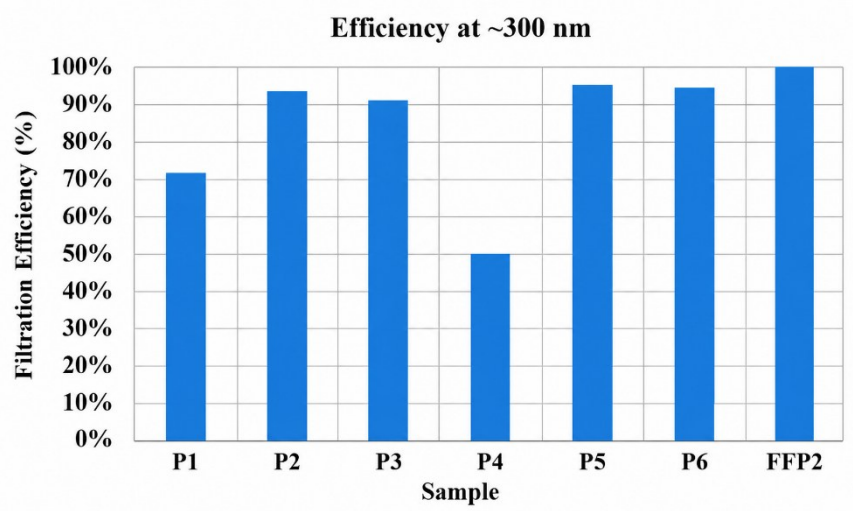



**Figura 3.** Eficiencia de filtración para partículas ≥ 0.3 µm.

El análisis del factor de calidad indica que ciertas configuraciones permiten optimizar el equilibrio entre eficiencia y caída de presión, destacando formulaciones intermedias como las más adecuadas desde el punto de vista funcional.

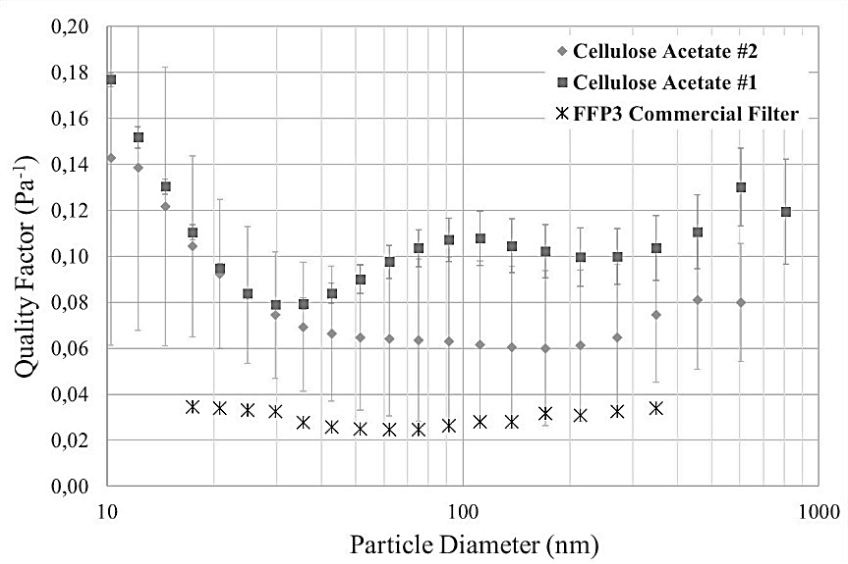



**Figura 4.** Factor de calidad de filtración (relación entre eficiencia de filtración y caída de presión) frente a diámetro de partícula.

En términos de actividad antimicrobiana, se observa que los sistemas con nanopartículas de plata presentan reducciones bacterianas superiores al 99%, lo que se traduce en valores A superiores a 2 según el estándar ISO 20743. En particular, algunas formulaciones alcanzan valores significativamente superiores frente a bacterias Gram negativas.

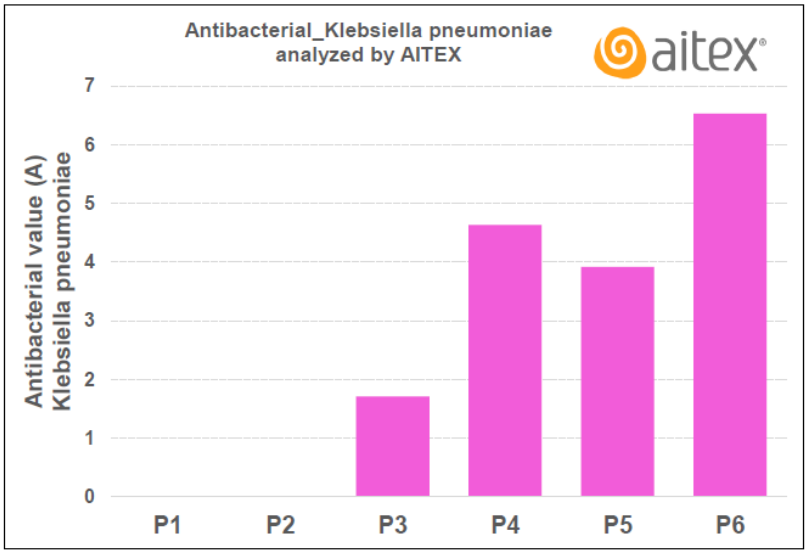



**Figura 5.** Valores de actividad antibacteriana frente a *Klebsiella pneumoniae* (Gram negativa).

## Evaluación del ciclo de vida y sostenibilidad

El análisis de ciclo de vida revela que el impacto ambiental y el coste están fuertemente condicionados por la cantidad de material activo incorporado y por el gramaje del sistema. En general, el aumento de la carga funcional conduce a un incremento del impacto ambiental.

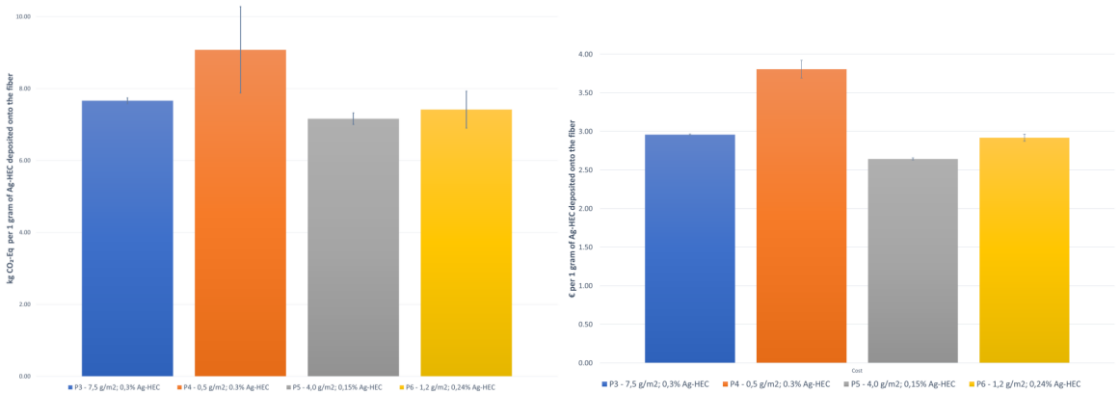



**Figura 6.** Impacto ambiental (izq.) y económico (dcha.) de una unidad funcional compuesta por 1g de AgNPs incorporado vía electrospinning. Comparativa de muestras P3, P4, P5 y P6 (azul, naranja, gris y amarillo respectivamente).

Los resultados de optimización indican que configuraciones con niveles intermedios de funcionalización ofrecen el mejor compromiso entre rendimiento y sostenibilidad. En particular, se identifican configuraciones que minimizan el impacto por unidad funcional, definida como la cantidad de plata depositada.

### Liberación de nanopartículas y evaluación de seguridad

Uno de los aspectos críticos del enfoque SSbD es la evaluación de la posible liberación de nanopartículas durante el uso del sistema. En este estudio, se han realizado ensayos experimentales que muestran la presencia de liberación de plata en condiciones de operación.

Los resultados indican que la cantidad liberada depende significativamente de la formulación y de la estructura del material, siendo necesario optimizar estos parámetros para minimizar la exposición. Este análisis se complementa con modelos de exposición basados en flujos de masa, que permiten estimar escenarios realistas de uso.

**Tabla 2.** Ensayos de liberación de AgNPs en fase de utilización.

| Muestra | Ag (µg) | | Ag (µg/g filtro) | | Volumen aire ($m^3$) | Horas | Flujo (L/min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mean | dev | mean | dev | mean | total | mean |
| P2 | 0.513 | 0.370 | 13 | 9 | 20 | 16 | 20 |
| Comercial (UNIMA-RELAXSAN) | 8.657 | 0.587 | 161 | 11 | 17 | 8 | 36 |
| P6 | 9.123 | 0.785 | 246 | 21 | 20 | 16 | 20 |

### Optimización multiobjetivo

La integración de todos los KPIs permite definir un espacio de diseño en el que se identifican soluciones óptimas desde una perspectiva multidimensional. Este análisis pone de manifiesto la existencia de múltiples configuraciones que cumplen simultáneamente criterios de funcionalidad, seguridad y sostenibilidad.

El proceso de optimización permite reducir el dominio de soluciones y seleccionar aquellas configuraciones que maximizan el rendimiento global del sistema.

## CONCLUSIONES

El caso de estudio analizado demuestra la aplicabilidad del enfoque SSbD en el desarrollo de sistemas avanzados de filtración de aire basados en nanomateriales.

La integración de criterios de funcionalidad, seguridad y sostenibilidad permite identificar configuraciones optimizadas que alcanzan altos niveles de rendimiento sin comprometer aspectos críticos como la exposición o el impacto ambiental.

El proyecto INTEGRANO proporciona herramientas clave para implementar este enfoque en entornos industriales, facilitando la transición hacia soluciones más seguras y sostenibles en el ámbito de los materiales avanzados.

## REFERENCIAS

[1] European Commission (2022). Safe and Sustainable by Design framework. https://research-and-innovation.ec.europa.eu

[2] Rana, A. K.; *et al.* (2023). "Cellulose-based materials for filtration applications". *Industrial Crops and Products*, v. 194, p.p. 116331. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116331

[3] Nicosia, Alessia; *et al.* (2016). "Electrospun nanofibers for filtration applications". *Chemical Engineering Science*, v. 153, p.p. 284–294. http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.017

[4] Motta, G.; *et al.* (2023). "Toxicological assessment of silver nanoparticles". *Toxics*, v. 11, n. 2, p.p. 195. http://dx.doi.org/10.3390/toxics11020195

[5] Costa, A. L.; et al. (2022). "Eco design for Ag-based antimicrobial solutions". *Environmental Science: Nano*, v. 9, p.p. 4295–4304. http://dx.doi.org/10.1039/d2en00178k

# Percepción y prácticas de seguridad en laboratorios universitarios de química

**Cuenca-Lozano, María F. [(1)], Cuenca-Lozano, Pablo Fernando [(2)]**
*(1) Departamento de Química y Producción, Universidad Técnica Particular de Loja, San Cayetano Alto s/n, Loja, Ecuador. mfcuenca70@utpl.edu.ec.*
*(2) Departamento de Economía, Ambiente y Territorio, FLACSO Sede Ecuador, La Pradera E7-174, Quito, Ecuador.*

## RESUMEN

La gestión de la seguridad en laboratorios académicos es una preocupación global debido al alto riesgo por exposición a procesos químicos. El objetivo de este estudio es analizar el perfil sociodemográfico, la percepción de riesgo y la prevalencia de accidentes en personal de laboratorio de dos universidades del sur de Ecuador. Se realizó un estudio transversal descriptivo mediante un cuestionario anónimo validado. Los resultados revelaron una preocupante ocurrencia de eventos adversos: el 65,5% reportó accidentes y el 96,6% experimentó síntomas de salud relacionados, siendo la inhalación de vapores (58,6%) y las cefaleas (41,4%) los más comunes. Se encontró una correlación positiva significativa entre la ocurrencia de accidentes y la manifestación de síntomas ($\rho$=0,53; $\rho$<0,01). Los hallazgos indican que, aunque la capacitación es valorada, su impacto es limitado sin mejoras estructurales en infraestructura y una cultura de reporte no punitiva.

**Palabras clave**: Riesgo químico, percepción de riesgo, prácticas de seguridad, laboratorios universitarios, salud ocupacional.

## INTRODUCCIÓN

La seguridad en los laboratorios de química de las instituciones de educación superior (IES) es un componente crítico de la gestión universitaria, sin embargo, a menudo se ve relegada frente a las prioridades de investigación y docencia. Históricamente, se ha documentado que los laboratorios académicos presentan tasas de incidentes significativamente superiores a los laboratorios industriales, una discrepancia atribuida a la alta rotación de estudiantes, la diversidad de procesos experimentales y, en muchos casos, a infraestructuras obsoletas o con mantenimiento deficiente. En el contexto de América Latina, la implementación de la seguridad química afronta desafíos regulatorios agudos, puesto que los marcos legales suelen diseñarse con un enfoque puramente industrial, careciendo de adaptaciones específicas para las particularidades de la docencia y la investigación científica. Investigaciones previas sugieren que el personal académico en la región utiliza significativamente menos equipos de protección individual en comparación con el sector industrial, incrementando de forma drástica su vulnerabilidad ante exposiciones crónicas. Asimismo, las metodologías simplificadas de evaluación de riesgos aplicadas comúnmente en las universidades locales suelen ser incompletas al omitir variables críticas como el estado real de los sistemas de ventilación general, el confinamiento en el almacenamiento de reactivos o la efectividad de los controles organizacionales. En el contexto ecuatoriano, la normativa de seguridad y salud en el trabajo ha evolucionado recientemente con la implementación del Decreto

Ejecutivo 255 de 2024, que establece directrices más estrictas para la identificación y control de riesgos. No obstante, la aplicación de estas normas en el ámbito académico enfrenta retos particulares, como la percepción subjetiva del riesgo por parte del personal técnico y docente. La percepción de riesgo no solo depende de la peligrosidad objetiva de las sustancias químicas, sino también de factores psicológicos, la experiencia previa y la confianza en los sistemas de protección colectiva. Este trabajo se fundamenta en la necesidad de caracterizar la situación actual de los laboratorios en la región sur del Ecuador para proponer estrategias de intervención basadas en evidencia que minimicen la siniestralidad laboral y promuevan una cultura de seguridad robusta [1]–[5].

## OBJETIVOS

El estudio se planteó bajo los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el perfil sociodemográfico y laboral de los técnicos de laboratorio en las universidades objeto de estudio.
- Evaluar la percepción del riesgo químico y la eficacia percibida de las medidas de control (Equipos de Protección Individual y Colectiva).
- Determinar la prevalencia de accidentes de trabajo y síntomas de enfermedades profesionales reportados en el último año.
- Identificar posibles correlaciones entre las variables sociodemográficas, la formación en seguridad y la ocurrencia de eventos adversos.

## METODOLOGÍA

Se empleó un diseño de investigación cuantitativo, con un alcance descriptivo y transversal. La población de estudio estuvo conformada por 29 técnicos de laboratorio de dos universidades de la ciudad de Loja, Ecuador. La recolección de datos se realizó mediante una encuesta estructurada compuesta por 56 ítems, dividida en cinco secciones: datos sociodemográficos, percepciones de riesgo, prácticas y cultura de seguridad, disponibilidad de equipamiento y prevalencia de efectos en la salud. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando software especializado, aplicando pruebas de normalidad, correlaciones de Spearman para variables no paramétricas y pruebas U de Mann-Whitney para la comparación entre grupos. Se garantizó el anonimato y la confidencialidad de los participantes siguiendo los protocolos del Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos [2], [6]. Los ítems organizados metodológicamente en cuatro dimensiones operativas son:

***Perfil Sociodemográfico y Ocupacional***: Recopiló variables cuantitativas continuas (edad, años de experiencia laboral con químicos) y categóricas (género, nivel de instrucción formal, horas de exposición semanal directa y tipología de actividades principales desarrolladas en el laboratorio).

***Dimensiones de Percepción del Riesgo Químico***: Evaluó la autovaloración del conocimiento del riesgo, el conocimiento percibido por parte de la universidad, el grado de temor al daño, la probabilidad subjetiva de sufrir lesiones, la severidad percibida de las consecuencias y el nivel de controlabilidad y evitabilidad del peligro. Estas variables se operacionalizaron mediante escalas semánticas y de tipo Likert de 7 puntos con anclajes específicos de intensidad (ej. 1 = Muy bajo a 7 = Muy alto). Asimismo, se incluyó una escala analógica global de estimación del riesgo acotada entre 0 y 100 puntos.

***Prácticas de Seguridad y Clima Organizacional***: Midió la frecuencia auto reportada en el uso de Equipos de Protección Individual (EPI), específicamente mandiles, guantes, mascarillas y gafas de seguridad, mediante una escala de 5 puntos (1 = Nunca a 5 = Siempre / Cuando sea necesario). Adicionalmente, evaluó con escala Likert de 5 puntos (1 = Totalmente en desacuerdo a 5 = Totalmente de acuerdo) cuatro constructos de cultura preventiva: proactividad de la supervisión, confort psicológico para el reporte de incidentes, priorización de la seguridad sobre la velocidad operativa y la tendencia a omitir procedimientos por premura. La disponibilidad real de infraestructura crítica (campanas extractoras, duchas de emergencia y Hojas de Datos de Seguridad - SDS) se cuantificó con opciones categóricas de verificación funcional.

***Prevalencia de Siniestralidad y Morbilidad***: Registró de forma dicotómica (Sí / No) la ocurrencia de cinco tipologías de accidentes específicos (inhalación de vapores, derrames en piel/ropa, incendios/explosiones, salpicaduras en ojos/rostro y cortes) sufridos en los últimos 12 meses, así como la presencia recurrente de seis síntomas de salud crónicos o subagudos vinculados directamente con las vías de ingreso químico.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos demuestran una fuerza laboral técnica altamente cualificada pero expuesta a condiciones de riesgo persistentes. El 82,8% de los participantes posee títulos de cuarto nivel (Maestría o PhD), lo que sugiere una alta capacidad técnica teórica. Sin embargo, esta formación no se traduce necesariamente en una reducción de la accidentalidad. A continuación, en la Tabla 1 se detallan los principales hallazgos de este estudio.

**Tabla 1**. Indicadores estadísticos y hallazgos

| Categoría | Indicador / Variable | Resultado Principal |
|---|---|---|
| *Siniestralidad* | Tasa de accidentes (último año) | 65,5% de los técnicos reportó al menos un evento. |
| *Salud* | Prevalencia de síntomas | 96,6% de la muestra experimentó efectos en la salud. |
| *Principales Eventos* | Accidente más frecuente | Inhalación de vapores y gases (58,6%). |
| *Sintomatología* | Síntoma predominante | Cefaleas frecuentes (41,4%). |
| *Infraestructura* | Control de ingeniería | Solo el 46,4% cuenta con campanas extractoras funcionales. |
| *Correlación* | Accidentes vs. Síntomas | Relación positiva significativa ($\rho$=0,53; $\rho$<0,01). |
| *Formación* | Eficacia de capacitación | No existe asociación entre recibir formación y la reducción de accidentes ($\rho$=1,000). |
| *Cultura* | Reporte de incidentes | Los técnicos se sienten cómodos reportando (Mediana: 4/5). |

La Tabla 1 sintetiza los hallazgos críticos sobre la situación de seguridad en los laboratorios analizados, el dato más alarmante es la siniestralidad reportada (65,5%), una cifra que supera las medias documentadas en entornos industriales y se alinea con

la mayor vulnerabilidad de los laboratorios académicos frente a los comerciales Esta alta tasa de accidentes tiene una correlación directa en la salud de los técnicos, se reporta una prevalencia de síntomas que alcanza el 96,6%, destacando la inhalación de vapores (58,6%) y las cefaleas (41,4%) como los eventos y síntomas predominantes, respectivamente.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de comparación inferencial

| Dimensión de Contraste | Variable de Resultado Evaluada | Prueba Estadística Aplicada | Valor de Significación (p-value) |
|---|---|---|---|
| 1. Análisis interinstitucional *(Institución 1 vs. Institución 2)* | Conteo total de accidentes anuales | Mann-Whitney U | 0,749 |
| | Conteo total de síntomas crónicos | Mann-Whitney U | 0,963 |
| | Prevalencia dicotómica de accidentes | Prueba Exacta de Fisher | 1,000 |
| | Prevalencia dicotómica de síntomas | Prueba Exacta de Fisher | 1,000 |
| | Percepción de severidad del daño | Mann-Whitney U | 0,717 |
| | Frecuencia en uso de gafas protección | Mann-Whitney U | 0,139 |
| | Priorización cultural de la seguridad | Mann-Whitney U | 0,871 |
| 2. Capacitación institucional | Provisión de cursos por universidad | Prueba Exacta de Fisher | 0.00*** |
| | Entrenamiento vs. Ocurrencia accidentes | Prueba Exacta de Fisher | 1,000 |
| 3. Análisis por género *(Personal Femenino vs. Masculino)* | Conteo de accidentes sufridos | Mann-Whitney U | 0,280 |
| | Conteo de síntomas manifestados | Mann-Whitney U | 0,191 |
| | Prevalencia dicotómica de accidentes | Prueba Exacta de Fisher | 1,000 |

** p < 0.10; ** p < 0.05; *** p < 0.01*

Los datos de la Tabla 2 indican que los valores de significancia para siniestralidad y salud para ambas instituciones presentan exactamente el mismo escenario crítico de afectación, es decir, las fallas de seguridad no son exclusivas de una entidad. En relación a la percepción de la gravedad del daño y prácticas de seguridad tampoco se muestran diferencias estadísticas significativas. Esto indica que los técnicos de ambas universidades comparten el mismo ecosistema cognitivo y los mismos hábitos de protección individual.

En la variable de capacitación se muestra una diferencia altamente significativa en la frecuencia con la que las instituciones dictan capacitaciones a su personal. Pese a la diferencia antes mencionada al cruzar capacitación con ocurrencia de accidentes el resultado es un valor *p*=1,000, estadísticamente, esto demuestra una ausencia absoluta de asociación protectora, lo cual sugiere que haber recibido capacitación formal no redujo en lo absoluto la probabilidad de que el técnico sufriera un accidente dentro del laboratorio. La ausencia de diferencias significativas entre las instituciones y géneros refuerza la tesis de que estos riesgos son fallas sistémicas inherentes a la cultura científica regional y no problemas de gestión individual.

La robustez estadística del estudio se manifiesta en la correlación significativa hallada entre la ocurrencia de accidentes y la manifestación de síntomas ($\rho$=0,53; $\rho$<0,01), lo que sugiere que los incidentes menores, lejos de ser eventos aislados, generan un efecto acumulativo en el bienestar físico del personal. Un punto de discusión central es la "Paradoja de la Percepción". Se observó que la conciencia sobre la gravedad del riesgo no es preventiva, sino reactiva: aumenta significativamente solo en aquellos técnicos que ya han sufrido accidentes previos ($\rho$=0,33; $\rho$<0,10). Esto explica por qué no existe una asociación estadística entre haber recibido capacitación y la reducción efectiva de accidentes ($\rho$=1,000).

Los resultados sugieren que la formación teórica, aunque valorada por el personal, resulta insuficiente si no se acompaña de mejoras en los controles de ingeniería, dado que menos de la mitad de los técnicos (46,4%) cuenta con campanas de extracción totalmente funcionales. Al no existir extractores funcionales, el profesional automatiza el uso de batas y guantes por una presión social o normativa estandarizada, pero evalúa de forma subjetiva y momento a momento el uso de gafas de protección o respiradores especiales basándose en su apreciación intuitiva de la tarea inmediata o en la molestia física. Estos hallazgos subrayan la urgencia de aplicar el Decreto Ejecutivo 255 (2024) para transitar hacia un modelo de seguridad que priorice la infraestructura sobre la simple instrucción del trabajador [4], [6], [7].

## CONCLUSIONES

El estudio concluye que los laboratorios universitarios analizados presentan una alta vulnerabilidad ante el riesgo químico, manifestada en una elevada prevalencia de accidentes y síntomas crónicos. A pesar de que los técnicos cuentan con formación avanzada y capacitación específica, estas medidas son insuficientes ante las deficiencias en infraestructura técnica, como los sistemas de ventilación y extracción de contaminantes. Es fundamental transitar de un modelo de seguridad basado únicamente en la responsabilidad individual del técnico hacia un enfoque de seguridad inherente y sistémica. Se recomienda la actualización inmediata de los planes de mantenimiento preventivo y la implementación de sistemas de vigilancia epidemiológica activa que permitan detectar efectos a la salud antes de que se conviertan en patologías irreversibles. El cumplimiento del nuevo Decreto 255 (2024) debe ser el eje rector para la readecuación de estos espacios científicos.

## REFERENCIAS

[1] Al-Mekhlafi,Al-Baraa Abdulrahman; Noreen Kanwal; Mohammed Nasser Alhajj; Ahmad Shahrul Nizam Isha; and Abdullah O. Baarimah; (2025).“Trends in Safety Culture Research: A Scopus Analysis.”*Safety*.vol. 11, no. 2, doi: 10.3390/safety11020033.

[2] Nasrallah,Inaam M.; Assem K. El Kak; Lina A. Ismaiil; Rihab R. Nasr; and Wafa T. Bawab; (2022).“Prevalence of Accident Occurrence Among Scientific Laboratory Workers of the Public University in Lebanon and the Impact of Safety Measures.”*Saf. Health Work*.vol. 13, no. 2.pp. 155–162, doi: 10.1016/j.shaw.2022.02.001.

[3] Ministerio,de Trabajo Ecuador; *Decreto ejecutivo 255. Reglamento de seguridad y salud en el trabajo.*

[4] Wachinger,Gisela; Ortwin Renn; Chloe Begg; and Christian Kuhlicke; (2012).“The Risk Perception Paradox-Implications for Governance and Communication of Natural Hazards.”*Risk Anal.*vol. 33, doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01942.x.

[5] Fatemi,Farin; Alireza Dehdashti; and Mohammadreza Jannati; (2022).“Implementation of Chemical Health, Safety, and Environmental Risk Assessment in Laboratories: A Case-Series Study.”*Front. public Heal.*vol. 10.p. 898826, doi: 10.3389/fpubh.2022.898826.

[6] The Laboratory Safety,Institute; “Lab Safety: Terrifying Statistics.” https://www.labsafety.org/lab-safety-terrifying-statistics

[7] Sotomayor Pineda,Juan Manuel; Jose Carlos Mora Barrantes; Christopher Afú Méndez; Jocelyn López Martínez; and María Alejandra Vallejo Salas; (2021).“Evaluación del riesgo químico mediante la aplicación de un índice de seguridad inherente: un caso de estudio en cursos de docencia de química general en un centro universitario.”*Rev. Tecnol. en Marcha*.vol. 35, no. 1 SE-Artículo científico.p. Pág. 100-114, doi: 10.18845/tm.v35i1.5288.

# Compuestos de PLA de alto contenido en lignina plastificados con acetato de eugenilo para materiales basados en economía circular

**Barrera-Juca, David[(1)*], Silvestre, Jordi[(1)], Gomez-Cartula, Jaume[(1)], Balart, Rafael[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, Alicante. *Email: dbarjuc@upv.edu.es*

## RESUMEN

En este estudio se desarrollaron biopolímeros sostenibles basados en ácido poliláctico (PLA) con alto contenido de lignina (30–50% en peso), empleando acetato de eugenilo (EAc), un derivado natural del eugenol, como plastificante, y PLA injertado con anhídrido itacónico (PLA-*g*-IA) como compatibilizante. Las formulaciones fueron procesadas mediante extrusión y moldeo por inyección con el objetivo de mejorar la ductilidad del PLA y aumentar el contenido bio-basado del material. A nivel térmico, el EAc provocó una reducción significativa de la temperatura de transición vítrea del PLA, pasando de aproximadamente 60 °C a valores cercanos a 35 °C, evidenciando una plastificación altamente eficiente. Mecánicamente, el PLA plastificado mostró un incremento muy notable de la ductilidad, alcanzando alargamientos a rotura superiores al 400%. La incorporación de lignina incrementó progresivamente la rigidez y dureza de los materiales, aunque contenidos elevados de lignina redujeron la tenacidad debido a fenómenos de aglomeración y concentración de tensiones. Estos resultados establecen una nueva vía para diseñar materiales de PLA con alto contenido biológico y totalmente desintegrables mediante estrategias sinérgicas de modificación natural.

**Palabras clave:** Ácido poliláctico, lignina, biocompuestos, extrusión, moldeo por inyección, biodegradabilidad.

## INTRODUCCIÓN

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero de origen renovable ampliamente estudiado por su biodegradabilidad industrial y su potencial en aplicaciones sostenibles [3]. Sin embargo, su aplicación práctica se ve limitada por su fragilidad intrínseca, bajo alargamiento a la rotura (~11%) y elevada temperatura de transición vítrea ($T_g \approx 60$ °C), lo que restringe su desempeño en productos que requieren absorción de energía y deformación controlada [1; 7]. Para superar estas limitaciones, se han explorado diversas estrategias de modificación, incluyendo plastificación natural y la incorporación de rellenos bio-basados [4; 5].

La plastificación con acetato de eugenilo (EAc), un derivado fenólico natural del eugenol, permite aumentar la movilidad molecular de PLA, reduciendo su $T_g$ a valores cercanos a 28-35 °C y aumentando el alargamiento a la rotura por encima del 400%, transformando el polímero de un material frágil a uno altamente dúctil [1]. Simultáneamente, la incorporación de lignina en proporciones de 30-50% en peso actúa como un refuerzo natural, aumentando progresivamente el módulo elástico (hasta

~3672 MPa a −100 °C) y la dureza Shore D (hasta 83) en los composites de mayor contenido [4-6]. La compatibilización con PLA injertado con anhídrido itacónico (PLA-*g*-IA) permite mejorar la dispersión de la lignina y la transferencia de esfuerzos, mitigando la fragilidad típica de sistemas con altas concentraciones de relleno [2; 5; 6].

El enfoque sinérgico de EAc y lignina ha permitido desarrollar biocomposites de PLA con un equilibrio optimizado entre ductilidad y rigidez, manteniendo propiedades térmicas adecuadas para aplicaciones funcionales. La caracterización mecánica se realiza mediante ensayos de tracción, impacto y dureza Shore D, mientras que las propiedades térmicas se estudian con calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA) y análisis dinámico mecánico térmico (DMTA), proporcionando una evaluación integral del desempeño de los materiales frente a diferentes cargas y temperaturas.

## EXPERIMENTAL

### Plastificación de PLA con EAc y lignina

Los pellets de PLA se secaron a 40 °C durante 24 horas en un horno deshumidificador de Industrial Marsé (Barcelona, España) para eliminar la humedad residual y evitar la degradación durante el procesado, ya que los poliésteres alifáticos son sensibles a la humedad. Para la preparación de los biocomposites, se incorporó acetato de eugenilo (EAc) en un 20% en peso como plastificante y lignina alcalina en porcentajes de 30, 40 y 50% en peso como refuerzo natural. La compatibilización se realizó con PLA injertado con anhídrido itacónico (PLA-*g*-IA) en proporción ajustada a 10% respecto a la lignina.

Las mezclas se realizaron mediante extrusión reactiva en una microextrusora de doble husillo Xplore MC-40 (Sittard, Países Bajos) a 170 °C y 100 rpm durante 2 min para asegurar una dispersión homogénea de EAc y lignina. Previamente, PLA y lignina se mezclaron en bandejas de aluminio en cargas discontinuas de 20 g. La masa fundida se moldeó posteriormente por inyección utilizando una unidad DSM IM12 (Sittard, Países Bajos) a 170 °C, con temperatura del molde a 30 °C y presión de 8 bar, obteniéndose muestras de ensayo estandarizadas para caracterización mecánica y térmica.

### Caracterización térmica

Las propiedades térmicas se evaluaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) con un equipo Discovery DSC25 de TA Instruments (New Castle, EE. UU.) bajo atmósfera de nitrógeno (caudal 50 mL/min). Las muestras, de 5-8 mg, se colocaron en crisoles de aluminio y se sometieron a un programa de calentamiento de 40 a 180 °C, seguido de enfriamiento a 0 °C y un segundo calentamiento hasta 200 °C, a una velocidad de 10 °C/min. El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó en un TG-DSC2 de Mettler-Toledo (Columbus, EE. UU.), con un rango de 30 a 700 °C a 20 °C/min en atmósfera de aire, evaluando la temperatura de degradación al 5% ($T_{5\%}$), temperatura de máxima degradación ($T_{max}$) y residuo final.

### Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas se determinaron mediante ensayos de tracción, impacto Charpy y dureza Shore D. Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina ELIB 50 de SAE Ibertest (Madrid, España) a 10 mm/min con una célula de 5 kN, siguiendo ISO 527 sobre al menos 10 muestras por formulación, registrando resistencia a la tracción ($\sigma_{max}$), módulo elástico (E) y alargamiento a la rotura ($\varepsilon_b$). La resistencia al impacto se midió con un péndulo Charpy de 6 J de Metrotec S.A. (San Sebastián, España) sobre muestras entalladas con radio 0,25 mm siguiendo ISO 179-1:2010. La

dureza Shore D se evaluó con un durómetro J. Bot Instruments 76-D (Barcelona, España) según ISO 868:2003, promediando al menos 10 mediciones por muestra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ensayos mecánicos

Los resultados de los ensayos de tracción, impacto Charpy y dureza Shore D se muestran en la Tabla 1 para los diferentes composites de PLA plastificado con EAc y diferentes contenidos de lignina. Como se observa, el alargamiento a la rotura del PLA puro fue de aproximadamente 11%, mientras que la adición de 20% EAc aumentó significativamente la ductilidad, alcanzando valores superiores al 400%. La incorporación de lignina redujo progresivamente la ductilidad, con alargamientos a la rotura del 19%, 6% y 4% para los composites con 30, 40 y 50% de lignina, respectivamente, debido a la rigidez intrínseca del refuerzo y la formación de microagregados. Con respecto a la resistencia a tracción, se observa como esta disminuyó con la plastificación, pasando de 75 MPa en PLA puro a 28 MPa en PLA-EAc. La incorporación de lignina produjo valores intermedios de 16-19 MPa, reflejando la combinación de compatibilización y rigidez del refuerzo.

La resistencia al impacto Charpy mostró que el PLA plastificado con EAc no rompió bajo las condiciones de ensayo, evidenciando un aumento notable en la absorción de energía. La incorporación de lignina redujo la tenacidad, registrando valores de 7,6 kJ/m², 5,5 kJ/m² y 6,5 kJ/m² para las muestras reforzadas con 30, 40 y 50% de lignina, respectivamente.

La dureza Shore D del PLA disminuyó de 80,6 a 73 con la plastificación, mientras que la adición de lignina aumentó progresivamente la dureza hasta 83 Shore D en el composite con 50% de lignina.

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas de los materiales extraídas de los ensayos de tracción, impacto y dureza.

| Muestra | $\varepsilon_B$ (MPa) | $\sigma_B$ (MPa) | Resiliencia (kJ/m$^2$) | Dureza Shore D |
|---|---|---|---|---|
| PLA | 11 | 75 | 30 | 80,6 |
| PLA-EAc | 445 | 28 | NB | 73 |
| PLA-EAc-30LIG | 19 | 16 | 7,6 | 77 |
| PLA-EAc-40LIG | 6 | 19 | 5,5 | 80 |
| PLA-EAc-50LIG | 4 | 16,8 | 6,5 | 83 |

### Ensayos térmicos

El comportamiento térmico de las mezclas de PLA fue evaluado mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), como se muestra en la Figura 1. La incorporación de EAc evidenció un claro efecto plastificante, reflejado en un desplazamiento drástico de la temperatura de transición vítrea ($T_g$) desde ~60 °C (PLA puro) hasta el rango de 28-35 °C, así como en una reducción de la temperatura de cristalización en frío ($T_{cc}$) a ~80 °C debido al aumento en la movilidad de las cadenas poliméricas. Por otro lado, la adición de lignina en concentraciones del 30% al 50% en peso indujo un efecto de impedimento físico en el sistema. Aunque la $T_g$ se mantuvo estable respecto a la matriz plastificada,

el incremento en el contenido de lignina desplazó la $T_{cc}$ hacia temperaturas más altas y provocó un descenso progresivo en la temperatura de fusión ($T_m$), la cual disminuyó hasta ~148 °C para la muestra con 50% de lignina.

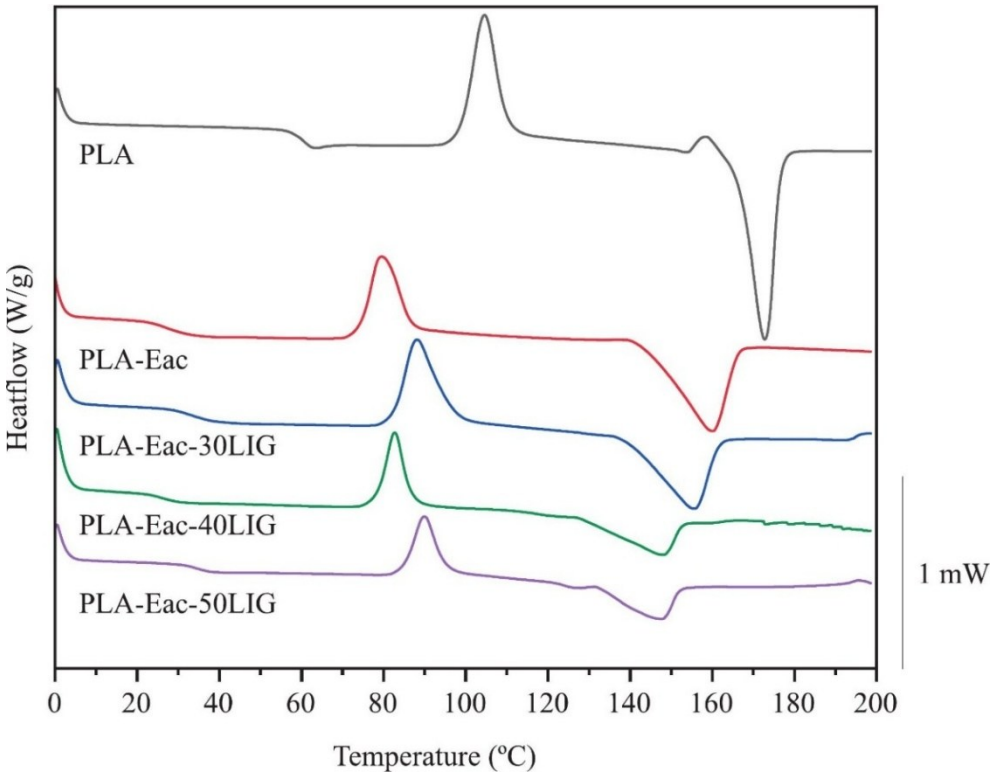



**Figura 1.** Curvas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el PLA puro, PLA plastificado con acetato de eugenilo (EAc) y sus respectivos composites con diferentes contenidos de lignina.

La estabilidad térmica del PLA y de los composites modificados se analizó mediante TGA y DTG (Figura 2). El PLA puro exhibió una descomposición en una sola etapa con una temperatura de máxima degradación ($T_{max}$) alrededor de los 340 °C y un residuo final prácticamente nulo. La incorporación de EAc (PLA-EAc) provocó una pérdida de masa temprana entre 150 y 200 °C debido a la volatilización del plastificante de bajo peso molecular, aunque mantuvo la $T_{max}$ de la matriz de PLA intacta. Por el contrario, la adición de altos contenidos de lignina (30-50% en peso) redujo notablemente la estabilidad térmica del sistema, desplazando la $T_{max}$ de manera drástica hacia el rango de 250–265 °C. Este adelanto en la degradación se atribuye a la descomposición térmica prematura de los componentes volátiles de la lignina y a su interacción con la matriz polimérica. No obstante, la presencia de lignina promovió de forma proporcional la formación de un residuo carbonoso (*char yield*) a 700 °C, alcanzando aproximadamente un 32% para la muestra con 50% de lignina, lo que demuestra la alta capacidad de carbonización de este refuerzo aromático.

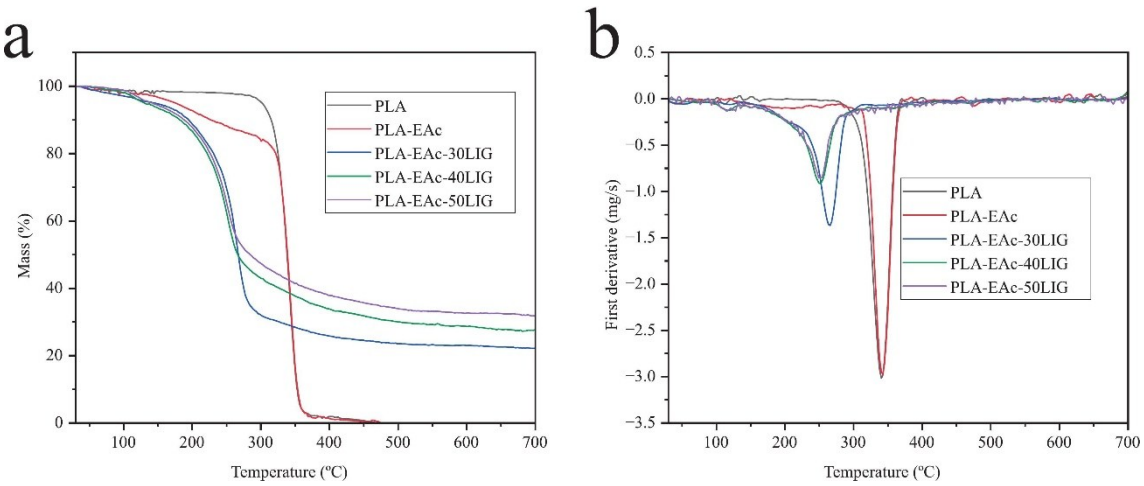



**Figura 2.** Análisis térmico de las muestras de PLA, PLA-EAc y composites con lignina: (a) curvas termogravimétricas (TGA) de pérdida de masa y (b) curvas de la primera derivada termogravimétrica (DTG) en función de la temperatura.

## CONCLUSIONES

La plastificación del PLA con 20% de acetato de eugenilo (EAc) incrementa significativamente la ductilidad del polímero, elevando el alargamiento a la rotura por encima del 400% y transformando un material frágil en altamente flexible. La incorporación de lignina como refuerzo natural permite incrementar la rigidez, el módulo elástico y la dureza Shore D, logrando un equilibrio entre ductilidad y rigidez cuando se emplea un 30% de lignina. Contenidos mayores de lignina (40-50%) generan una disminución de la tenacidad y alargamiento a la rotura debido a la formación de microagregados y concentración de tensiones.

A nivel térmico, EAc reduce de forma efectiva la temperatura de transición vítrea del PLA de aproximadamente 60 °C a 28-35 °C, manteniendo la ductilidad incluso en composites con altos contenidos de lignina. Por su parte, el análisis de TGA/DTG demostró que la incorporación de lignina adelanta la temperatura de máxima degradación al rango de 250–265 °C, pero favorece drásticamente la estabilidad a alta temperatura mediante la formación de un residuo carbonoso de hasta el 32% a 700 °C.

En conjunto, la combinación sinérgica de plastificante natural y lignina permite diseñar biocomposites de PLA con propiedades mecánicas y térmicas ajustables, adecuados para aplicaciones funcionales y sostenibles, como envases compostables, films agrícolas o productos de un solo uso.

## AGRADECIMIENTOS

J. Gomez-Caturla desea agradecer la ayuda JDC2024-053152-I financiada por el MCIN/AEI/https://doi.org/10.13039/501100011033 y, en su caso, por el “ESF Investing in your future” o por la “Unión Europea NextGenerationEU/PRTR”.

## REFERENCIAS

[1] Barrera-Juca, David; Lazaro-Hdez, Carlos; *et al.* (2025). "Naturally occurring eugenyl acetate as biobased plasticizer for sustainable polylactide formulations with improved toughness". *International Journal of Biological Macromolecules, v.311*, p.p. 144152.

[2] Frasca, Serenas; Katsiotis, Christos; *et al.* (2024). "Compatibility of kraft lignin and phenol-organosolv lignin with PLA in 3D printing and assessment of mechanical recycling". *ACS Applied Polymer Materials, v.6*, n. 22, p.p. 13574-13584.

[3] Gómez-Caturla, Jaume; Tejada-Oliveros, Ramon; *et al.* (2024). "Development and characterization of new environmentally friendly polylactide formulations with terpenoid-based plasticizers with improved ductility". *Journal of Polymers and the Environment, v.32*, n. 2, p.p. 749-762.

[4] Gordobil, Oihana; Egüés, Itziar; *et al.* (2014). "Physicochemical properties of PLA lignin blends". *Polymer Degradation and Stability, v.108*, p.p. 330-338.

[5] Lazaro-Hdez, Carlos; Valerga, Ana; *et al.* (2025). "Optimization of the ductile properties of poly (lactic acid)(PLA) using green citrate-based plasticizers and itaconic anhydride grafted PLA (PLA-g-IA)". *International Journal of Biological Macromolecules, v.307*, p.p. 142034.

[6] Marsilla, Ki; Verbeek, CJR. (2015). "Modification of poly (lactic acid) using itaconic anhydride by reactive extrusion". *European Polymer Journal, v.67*, p.p. 213-223.

[7] Swetha, ANgelin; Bora, Abhispa; *et al.* (2023). "A comprehensive review on polylactic acid (PLA)–Synthesis, processing and application in food packaging". *International Journal of Biological Macromolecules, v.234*, p.p. 123715.

# Pensar en capas: transferencia del razonamiento estratigráfico arqueológico al aprendizaje activo en grados de Ingeniería mediante entornos digitales inmersivos

**Jiménez-Puerto, Joaquín [1,2], Pérez-Aguilar, Blanca [3], Alfonso Molina, María [3]**

*(1) Dep. d'Estadística i Investigació Operativa Aplicades i Qualitat, Universitat Politècnica de València, joajipue@upv.es*

*(2) Dep. de Prehistòria, Arqueologia i Història Antiga, Universitat de València, blapeag@upv.es*

*(3) Dep. d'Estadística i Investigació Operativa Aplicades i Qualitat, Universitat Politècnica de València, malfmol@upvnet.upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta de innovación docente que extiende el uso de Minecraft Education Edition (MEE) para la enseñanza de razonamiento estratigráfico más allá del ámbito arqueológico convencional. Frente a estudios anteriores, aquí se propone la reconstrucción digital de yacimientos arqueológicos reales del área mediterránea ibérica como base para el diseño de entornos MEE, y su implementación como herramienta de aprendizaje activo en grupos STEM de la Universitat Politècnica de València (UPV), miembro de la Alianza Europea de Universidades Tecnológicas ENHANCE. La estratigrafía arqueológica se aborda como analogía estructural del razonamiento secuencial y la gestión de dependencias, competencias nucleares en los perfiles STEM.

**Palabras clave:** Minecraft Education Edition; reconstrucción digital; aprendizaje basado en juegos; STEM; estratigrafía arqueológica; Alianza ENHANCE; Ingeniería; aprendizaje activo.

## INTRODUCCIÓN

La enseñanza de metodologías analíticas en grados de ingeniería enfrenta un desafío recurrente: hacer tangible el razonamiento abstracto sobre secuencias de eventos, dependencias entre procesos y construcción de interpretaciones a partir de evidencias incompletas. Los métodos activos y el aprendizaje basado en juegos (game-based learning, DGBL) han demostrado eficacia para abordar este problema en múltiples disciplinas universitarias [1,2], si bien la mayoría de implementaciones en entornos técnicos utilizan escenarios de diseño artificial sin anclaje en datos procedentes del mundo real. Un trabajo reciente publicado en el Journal of Computer Assisted Learning [3] evaluó el uso de MEE para la enseñanza de estratigrafía arqueológica con estudiantes de Historia de la Universitat de València.

La presente comunicación propone dos extensiones complementarias. En primer lugar, partir de la reconstrucción digital de yacimientos arqueológicos reales para el diseño de los entornos MEE, incorporando la autenticidad geomorfológica y estratigráfica del registro. En segundo lugar, implementar esta metodología con estudiantes de Ingeniería en la Universitat Politècnica de València (integrante de la Alianza Europea de Universidades Tecnológicas ENHANCE), para quienes la estratigrafía opera como analogía estructural de competencias transversales STEM presentes de forma explícita en los contenidos curriculares del grado. El estudio contribuye, además, a la base de

evidencia empírica sobre aprendizaje activo en perfiles STEM, una de las prioridades pedagógicas del consorcio ENHANCE.

## MARCO TEÓRICO

La adopción de Digital Game-Based Learning (DGBL) en ciencias e ingeniería cuenta con respaldo empírico creciente. Dichev y Dicheva [4] identificaron el incremento de la motivación intrínseca como principal mediador del efecto, documentando además que los resultados positivos son altamente dependientes del contexto y del diseño de la intervención gamificada. Desde la teoría cognitiva del aprendizaje multimedia [2], los entornos tridimensionales interactivos facilitan la construcción de modelos mentales espaciales que los diagramas estáticos no pueden proporcionar. MEE ha mostrado resultados positivos en ciencias de materiales [5] y en el desarrollo de habilidades colaborativas en educación técnica [6], avalando su extensión a titulaciones de ingeniería. La disponibilidad creciente de herramientas de documentación y modelado tridimensional ha generado un acervo significativo de reconstrucciones digitales de sitios arqueológicos con potencial pedagógico aún escasamente explorado. Algunas iniciativas han combinado estas reconstrucciones con realidad virtual para visualización patrimonial [7] o con entornos de juego para narración histórica [8]. La traslación sistemática de geometría estratigráfica real a entornos MEE —de modo que el estudiante opere sobre la estructura espacial auténtica del registro— es, sin embargo, una aproximación que esta propuesta formaliza metodológicamente por primera vez. La fidelidad del escenario virtual al yacimiento real tiene implicaciones directas sobre la calidad del aprendizaje. Un modelo que incorpora la complejidad geomorfológica efectiva del registro —discontinuidades, buzamientos, unidades estratigráficas de difícil lectura— expone al estudiante a la misma ambigüedad interpretativa que caracteriza el trabajo arqueológico real. Esto conecta directamente con el principio de dificultad deseable [9]: las condiciones de aprendizaje que incrementan el esfuerzo cognitivo durante la práctica producen una retención y transferencia superiores a largo plazo.

El razonamiento estratigráfico: ordenar secuencias de eventos, inferir relaciones de anterioridad y posterioridad, gestionar dependencias y reconstruir procesos desde evidencias parciales, es estructuralmente análogo a competencias nucleares en ingeniería: la elaboración de diagramas de dependencias entre tareas (PERT, Gantt), el análisis de fallos en cadena (FMEA), el control de procesos industriales mediante series temporales o la trazabilidad en sistemas de gestión de la calidad. Todos ellos requieren el mismo tipo de razonamiento que el estudiante ejercita al construir una Matriz de Harris a partir de las unidades estratigráficas de una excavación virtual. Esta analogía, vinculada al concepto de pensamiento computacional [10] y a la lógica del aprendizaje situado, justifica la transposición didáctica propuesta: el contexto arqueológico actúa como dominio fuente que hace visible una estructura lógica habitualmente abstracta en los grados técnicos.

La UPV es miembro de ENHANCE (Alliance of European Universities of Technology), alianza constituida en 2019 que agrupa diez universidades tecnológicas líderes de Europa (TU Berlin, Chalmers UT, RWTH Aachen, Politecnico di Milano, TU Delft, ETH Zurich, Gdansk UT, NTNU, Warsaw UT y UPV), con el objetivo de construir un espacio educativo europeo sin barreras administrativas ni disciplinares. En el plano docente, la alianza promueve activamente el desarrollo y validación de formatos pedagógicos innovadores a través del Innovative Learning Campus (ILC) y del Certificate in Higher

Education Teaching (CHET), instrumentos orientados a mejorar las prácticas de enseñanza en universidades técnicas (ENHANCE Alliance, 2024). Una pregunta central del mandato educativo del consorcio es qué estrategias pedagógicas resultan transferibles entre instituciones con culturas académicas distintas y, más concretamente, cómo responden los estudiantes STEM ante metodologías activas desarrolladas originalmente en otros dominios del conocimiento.

La investigación sobre aprendizaje en educación superior STEM ha establecido con solidez que los métodos activos producen mejoras sustanciales sobre la enseñanza convencional. El meta-análisis de Freeman et al. [11], basado en 225 estudios de ciencias, ingeniería y matemáticas, documentó un incremento medio de 0,47 desviaciones típicas en el rendimiento bajo metodologías activas, con una probabilidad de fracaso académico 1,5 veces superior en los grupos de enseñanza magistral. Este efecto se mantiene con independencia del tamaño del grupo y del tipo de evaluación empleado. Los estudiantes de ingeniería presentan, además, una orientación cognitiva caracterizada por el pensamiento orientado a problemas estructurados, la preferencia por aprendizajes con resultados operacionales tangibles y la experimentación activa [12], rasgos que los predisponen favorablemente hacia entornos de aprendizaje experiencial con lógica procesal clara. Sin embargo, la literatura en DGBL aplicada a educación superior se concentra mayoritariamente en estudiantes de humanidades y ciencias sociales [3,13], y escasean los estudios que evalúen la respuesta de perfiles de ingeniería ante entornos gamificados diseñados desde una perspectiva disciplinar ajena. Esta laguna tiene relevancia directa para el marco ENHANCE: si la propuesta demuestra eficacia con estudiantes de ingeniería en la UPV, generará evidencia transferible a los centros del consorcio, contribuyendo a la construcción de un repertorio de buenas prácticas docentes con base empírica en el ámbito de las universidades técnicas europeas.

## PROPUESTA METODOLÓGICA

La selección de yacimientos obedece a tres criterios: (a) disponer de una secuencia estratigráfica documentada con un número acotado de unidades estratigráficas (8-15 UE), adecuado para la resolución operativa del bloque cúbico de MEE; (b) contar con acceso, permisos y documentación de registro disponibles; y (c) ofrecer variabilidad morfológica para cubrir distintas tipologías de razonamiento espacial. A partir de la documentación de campo disponible (planimetrías, fotografías de sección, registros de UE) se construye un modelo tridimensional que sirve de base para el diseño del mundo MEE. Cada UE se representa mediante un tipo de bloque de color específico siguiendo una leyenda cromática consensuada con la documentación original. Los elementos singulares (estructuras, fosas, cubetas, pavimentos) se reproducen mediante bloques funcionales que permiten la interacción directa. El resultado es un entorno que mantiene las relaciones espaciales y estratigráficas del yacimiento real dentro del lenguaje constructivo propio de MEE. El mundo MEE generado incorpora tres zonas diferenciadas: la réplica tridimensional del yacimiento en el estado previo a la intervención, donde los estudiantes realizan la excavación virtual capa a capa; una zona de referencia con los perfiles estratigráficos reales en formato plano, accesible en todo momento; y una interfaz de documentación in-game donde se registran los datos de cada UE y se propone la Matriz de Harris correspondiente. El modo multijugador permite la excavación colaborativa simultánea, replicando la dinámica de equipo habitual en el trabajo de campo. Una característica pedagógicamente relevante del entorno MEE es que permite observar las consecuencias de una mala práctica arqueológica (retirar

bloques sin documentar, mezclar UE, alterar la secuencia) de forma reversible y sin coste real. Esta posibilidad adquiere especial valor en los grados de ingeniería, donde la analogía con la pérdida de trazabilidad en un proceso industrial mal documentado, o con la propagación de un fallo no detectado en una cadena de dependencias, resulta inmediatamente reconocible para el estudiante.

La intervención se articulará en el contexto de asignaturas relacionadas con la aplicación de métodos estadísticos en ingeniería de la Universitat Politècnica de València, donde el razonamiento sobre dependencias y secuencias causales es contenido explícito del programa. La secuencia comprende seis sesiones de dos horas distribuidas en tres semanas: una sesión introductoria al vocabulario estratigráfico y al entorno MEE, dos sesiones de enseñanza convencional con diagramas y resolución de casos en papel, y tres sesiones de trabajo en el mundo MEE con los yacimientos reconstruidos. El acceso se facilita mediante las licencias institucionales de Microsoft disponibles en la UPV. El diseño experimental extiende el protocolo de Jiménez-Puerto y Gallello [3] en tres direcciones. En primer lugar, se añade un test diferido a ocho semanas (T4) para evaluar la retención a largo plazo, limitación señalada en el trabajo precedente. En segundo lugar, se incorporan la escala de motivación intrínseca (IMI; [14]) y la escala de carga cognitiva [15] administradas tras la sesión MEE, para identificar los mecanismos mediadores del efecto sobre el rendimiento en estudiantes de ingeniería.

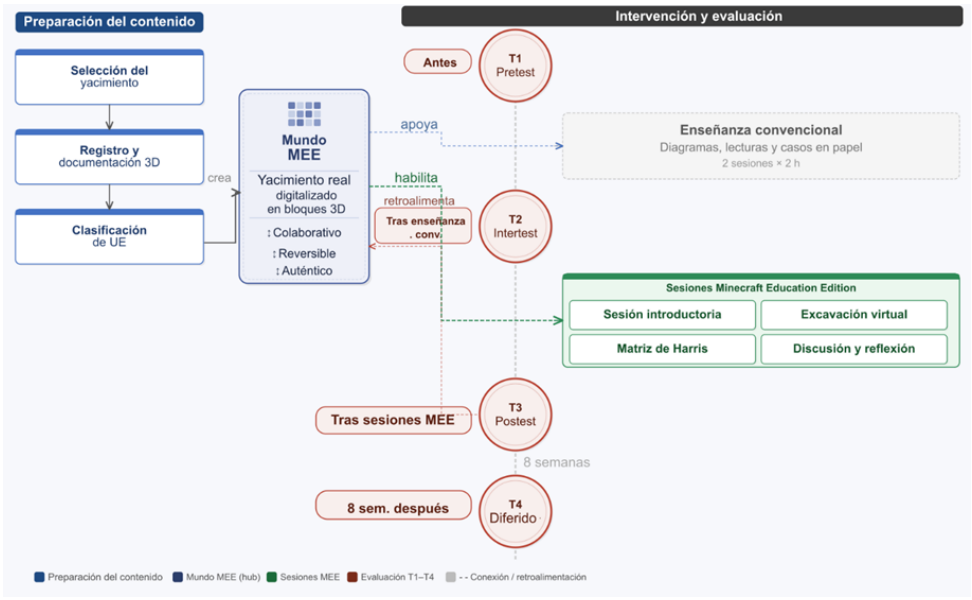



**Figura 1.** Pipeline metodológico de la propuesta. UE: Unidades Estratigráficas; IMI: Intrinsic Motivation Inventory; CC: Carga Cognitiva.

En tercer lugar, el análisis estadístico incluye modelos mixtos lineales que permiten controlar la variabilidad inter-sujeto y modelar el efecto de covariables relevantes como el rendimiento previo en la asignatura o el nivel de familiaridad con entornos digitales.

## DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS

La propuesta abre varias líneas de discusión pedagógica e investigadora. Desde el punto de vista de la autenticidad del aprendizaje, la reconstrucción digital de yacimientos reales supone un salto cualitativo respecto a los escenarios ad hoc: los estudiantes de ingeniería trabajan con la complejidad geomorfológica efectiva del registro, incluyendo discontinuidades, buzamientos y superposiciones que los diseños simplificados tienden

a resolver artificialmente. La escala de carga cognitiva permitirá contrastar empíricamente si el incremento de realismo del escenario penaliza o no el rendimiento en perfiles STEM. La transposición disciplinar hacia grados de ingeniería plantea si el efecto observado con estudiantes de Historia se mantiene, disminuye o modifica cualitativamente en perfiles que carecen de familiaridad previa con la estratigrafía, pero poseen mayor experiencia en razonamiento analítico formal. La hipótesis provisional, coherente con el perfil cognitivo documentado por Freeman et al. [11] para estudiantes STEM y con los principios del aprendizaje experiencial [12], es que la novedad del contexto arqueológico actúa como activador motivacional mientras la estructura lógica del problema resulta familiar, produciendo un efecto sinérgico que podría incluso superar al observado con estudiantes de Historia. En el marco de ENHANCE, los resultados de este estudio tendrán valor directo como evidencia transferible entre los centros del consorcio. Una intervención que demuestre eficacia con perfiles STEM en la UPV podría ser replicada y adaptada en otras universidades de la Alianza ENHANCE, generando un conjunto de datos comparativos de alcance europeo sobre el uso de entornos gamificados en educación técnica superior. Esta perspectiva de escalabilidad transnacional es coherente con los objetivos del Innovative Learning Campus y con la estrategia educativa conjunta de la alianza. Una limitación heredada del trabajo original es la ausencia de un grupo de control con asignación aleatoria.

## CONCLUSIONES

Esta comunicación presenta una propuesta de innovación docente que amplía en dos dimensiones el uso pedagógico de MEE en contextos STEM: la construcción de mundos virtuales a partir de reconstrucciones digitales de yacimientos arqueológicos reales, y la transferencia del razonamiento estratigráfico a grados de ingeniería como vía de desarrollo de competencias transversales de razonamiento secuencial, gestión de dependencias y pensamiento sistémico. La propuesta se inscribe en las prioridades pedagógicas de la alianza ENHANCE y contribuye a la creciente base de evidencia sobre la eficacia del aprendizaje activo con estudiantes STEM en educación superior. La doble afiliación institucional del equipo (Universitat de València para el componente arqueológico y Universitat Politècnica de València para el componente docente) constituye una condición estructural favorable, al combinar en un mismo equipo la competencia disciplinar en registro e interpretación arqueológica con la experiencia docente directa en la titulación de destino. Los resultados del estudio empírico asociado permitirán contrastar la generalización de los efectos previamente documentados y contribuir al repertorio de buenas prácticas pedagógicas con base empírica en el ámbito de las universidades técnicas europeas integradas en ENHANCE.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto ENHANCEplus (European Universities of Technology Alliance), financiado por la Unión Europea bajo el Programa Erasmus+, Grant Agreement No. 101124261, y por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU) a través de la ayuda para Alianzas Europeas de Universidades (RD 613/2025).

JJP está apoyado por el programa Atracció de Talent de la Universitat de València (LIF70903507 UV-POSTDOC-26-001 ADENDA01 44859202W)

## REFERENCIAS

[1] Hamari, Juho; Koivisto, Jonna; Sarsa, Harri (2014). "Does gamification work?–a literature review of empirical studies on gamification". En: *2014 47th Hawaii international conference on system sciences*, p.p. 3025-3034.

[2] Mayer, Richard E (2024). "The past, present, and future of the cognitive theory of multimedia learning". *Educational Psychology Review*, v. 36, n. 1, p.p. 8.

[3] Jiménez-Puerto, Joaquín; Gallello, Gianni (2025). "From Blocks to Artefacts: Exploring the Potential of Minecraft Education Edition in Archaeological Pedagogy". *Journal of Computer Assisted Learning*, v. 41, n. 3, p.p. e70054. http://dx.doi.org/10.1111/jcal.70054

[4] Dichev, Christo; Dicheva, Darina (2017). "Gamifying education: what is known, what is believed and what remains uncertain: a critical review". *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, v. 14, n. 1, p.p. 9. http://dx.doi.org/10.1186/s41239-017-0042-5

[5] Nkadimeng, Mahlatse; Ankiewicz, Piet (2022). "The Affordances of Minecraft Education as a Game-Based Learning Tool for Atomic Structure in Junior High School Science Education". *Journal of Science Education and Technology*, v. 31, n. 5, p.p. 605-620. http://dx.doi.org/10.1007/s10956-022-09981-0

[6] Andersen, Renate; Rustad, Mikkel (2022). "Using Minecraft as an educational tool for supporting collaboration as a 21st century skill". *Computers and Education Open*, v. 3, p.p. 100094. http://dx.doi.org/10.1016/j.caeo.2022.100094

[7] Ellenberger, Kate (2017). "Virtual and Augmented Reality in Public Archaeology Teaching". *Advances in Archaeological Practice*, v. 5, n. 3, p.p. 305-309. http://dx.doi.org/10.1017/aap.2017.20

[8] Politopoulos, Aris; Mol, Angus A. A.; Boom, Krijn H. J.; Ariese, Csilla E. (2019). ""History Is Our Playground": Action and Authenticity in *Assassin's Creed: Odyssey*". *Advances in Archaeological Practice*, v. 7, n. 3, p.p. 317-323. http://dx.doi.org/10.1017/aap.2019.30

[9] Bjork, Elizabeth L; Bjork, Robert A; others (2011). "Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning". *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society*, v. 2, n. 59-68, p.p. 56-64.

[10] Wing, Jeannette M. (2006). "Computational thinking". *Communications of the ACM*, v. 49, n. 3, p.p. 33-35. http://dx.doi.org/10.1145/1118178.1118215

[11] Freeman, Scott; Eddy, Sarah L.; McDonough, Miles; Smith, Michelle K.; Okoroafor, Nnadozie; Jordt, Hannah; Wenderoth, Mary Pat (2014). "Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 23, p.p. 8410-8415. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1319030111

[12] Kolb, David A (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press.

[13] Schrier, Karen (2018). "Guiding questions for game-based learning". *Second handbook of information technology in primary and secondary education*, p.p. 1-20.

[14] Ryan, Richard M. (1982). "Control and information in the intrapersonal sphere: An extension of cognitive evaluation theory.". *Journal of Personality and Social Psychology*, v. 43, n. 3, p.p. 450-461. http://dx.doi.org/10.1037/0022-3514.43.3.450

[15] Paas, Fred G. W. C.; Van Merriënboer, Jeroen J. G.; Adam, Jos J. (1994). "Measurement of Cognitive Load in Instructional Research". *Perceptual and Motor Skills*, v. 79, n. 1, p.p. 419-430. http://dx.doi.org/10.2466/pms.1994.79.1.419

# Comportamiento térmico de un bioplástico a base de zeína reforzada con nanotubos de haloisita

**Peñafiel-Alvarado, Jorge[(1)*], Boronat, Teodomiro[(2)], Fenollar, Octavio[(2)], Balart, Rafael[(2)]**

*(1) Pontificia Universidad Católica del Ecuador – Ibarra (PUCE – Ibarra), Av. Jorge Guzmán Rueda y Av. Padre Aurelio Espinoza Polit, Ibarra, 100112, Ecuador. *Email: jipenafiel@pucesi.edu.ec.*

*(2) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, Alicante, España.*

## RESUMEN

El presente estudio analiza el comportamiento térmico de materiales termoplásticos basados en zeína reforzados con nanotubos de haloisita (HNTs) y plastificados con dietilenglicol (DEG). La zeína, proteína derivada del maíz, representa una alternativa sostenible frente a los plásticos petroquímicos debido a su biodegradabilidad y potencial aplicación industrial. Sin embargo, sus limitaciones de procesamiento y propiedades mecánicas requieren modificaciones específicas para ampliar su funcionalidad. En el presente trabajo, las formulaciones fueron obtenidas mediante procesos de extrusión e inyección, incorporando diferentes concentraciones de HNTs (0-1 PHR). La caracterización térmica se realizó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados DSC mostraron una disminución progresiva de la temperatura de transición vítrea ($T_g$) con el incremento de HNTs, indicando una mayor movilidad molecular del sistema plastificado. Por otra parte, las curvas TGA y DTG evidenciaron una mejora moderada en la estabilidad térmica de las formulaciones reforzadas, observándose un desplazamiento de las temperaturas de degradación hacia valores superiores y una reducción en la velocidad máxima de degradación. Estos efectos se atribuyen a la acción barrera y al refuerzo estructural proporcionado por los nanotubos de haloisita.

**Palabras clave:** zeína, nanotubos de haloisita, bioplásticos, materiales termoplásticos, dietilenglicol, nanocompuestos, biopolímeros.

## INTRODUCCIÓN

La amplia utilización de materiales plásticos de origen petroquímico, impulsada por sus propiedades de versatilidad, resistencia mecánica, durabilidad y costos relativamente bajos de producción, ha favorecido su incorporación masiva en múltiples sectores industriales y de consumo [6]. Sin embargo, debido a que gran parte de estos materiales no son biodegradables, su acumulación en el ambiente se ha convertido en una problemática de gran relevancia [7]. Esta situación se agrava por las deficiencias existentes en la gestión y tratamiento de los residuos sólidos, lo que ha ocasionado impactos ambientales significativos, tales como la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos, la persistencia de desechos plásticos durante largos periodos de tiempo y el incremento de riesgos para la salud ambiental y humana [8].

Por lo tanto, los problemas ambientales relacionados con la gestión de residuos plásticos también pueden reducirse utilizando materiales de base biológica para producir los llamados bioplásticos [4]. El creciente interés por reemplazar los plásticos sintéticos derivados del petróleo mediante el uso de bioplásticos ha despertado una notable atención dentro de la comunidad científica. En este sentido, los materiales elaborados a base de proteínas han adquirido una especial relevancia debido a sus características biodegradables y su potencial aplicación en el desarrollo de productos más sostenibles [11]. Particularmente, el creciente interés por los materiales ecológicos, junto con la mayor demanda de ingredientes de origen vegetal durante las últimas décadas, ha impulsado significativamente la investigación relacionada con la aplicabilidad de la zeína en diversos sectores industriales [1].

La mayor parte de la zeína disponible comercialmente se obtiene a partir de la harina de gluten de maíz (CGM), un subproducto generado durante el proceso de molienda húmeda del maíz, en el cual también se producen almidón y licor de maceración. Este proceso industrial permite aprovechar las fracciones proteicas del grano de maíz para la obtención de compuestos de alto valor agregado, como la zeína [1]. A nivel mundial, la producción anual de maíz alcanza aproximadamente 560 millones de toneladas métricas, de las cuales cerca del 44,1% se destina a la producción de etanol. Esta elevada disponibilidad de materia prima favorece el aprovechamiento de subproductos agroindustriales y fortalece el interés por la utilización de proteínas derivadas del maíz en aplicaciones biotecnológicas e industriales [10].

El presente estudio propone mejorar el aprovechamiento de la zeína mediante su reforzamiento con nanotubos de haloisita y dietilenglicol, procesados mediante técnicas de extrusión e inyección, con el fin de mejorar su resistencia mecánica y proporcionar propiedades adicionales que amplíen sus aplicaciones potenciales. Aunque la zeína posee naturaleza polimérica, su procesamiento mediante técnicas convencionales presenta ciertas limitaciones, por lo que requiere modificaciones específicas para garantizar una fabricación adecuada y eficiente [2].

## EXPERIMENTAL

### Materiales

La zeína empleada en este estudio fue proporcionada por Sigma Aldrich (Madrid, España) en forma de polvo, con número CAS 9010-66-6, este material presentaba un contenido de humedad inferior al 8% y una pureza proteica del 90% de peso en base seca. Las zeínas constituyen un grupo de proteínas solubles en alcohol derivadas del maíz, pertenecientes principalmente a la familia de las prolaminas, que son proteínas de almacenamiento.

Por otro lado, los nanotubos de haloisita (HNTs) empleados en este estudio fue proporcionado por Sigma Aldrich (Madrid, España) en forma líquida, con número CAS 1332-58-7 y fórmula química lineal $Al_2Si_2O_5(OH)_4.2H_2O$. La nanoarcilla de haloisita se caracteriza por su morfología tubular, lo que le confiere propiedades únicas para aplicaciones de nanocompuestos. Presenta baja conductividad eléctrica y térmica, además de establecer fuertes interacciones por puentes de hidrógeno.

Como plastificante se empleó el dietilenglicol (DEG), identificado con el número CAS 111-46-6 con una pureza > 98,5%, fue suministrado por Merck Life Science S.L (Madrid, España). Es un líquido incoloro, inodoro e higroscópico, completamente miscible con agua, etanol y éter.

### Procesamiento de los materiales mediante extrusión e inyección

Para eliminar la humedad residual previa al procesamiento, la proteína de zeína se secó en un horno de circulación de aire Carbolite Eurotherm (Hope Valley, Inglaterra) a 60 °C durante 24h. Luego los nanotubos de haloisita fueron incorporados al dietilenglicol en estado líquido y dispersados mediante ultrasonido. Posteriormente, se elaboraron distintas formulaciones combinando proteína de zeína y la mezcla de nanotubos de haloisita con dietilenglicol. La mezcla se realizó manualmente en bandejas de aluminio, siguiendo las proporciones establecidas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Formulaciones desarrolladas de zeína termoplástica con nanotubos de haloisita.

| Muestra | Proteína de Zeína (% p/p) | DEG (% p/p) | HNTs (PHR) |
|---|---|---|---|
| Zein – Deg | 75 | 25 | - |
| Zein – Deg – 0,25 HNTs | 75 | 25 | 0,25 |
| Zein – Deg – 0,50 HNTs | 75 | 25 | 0,50 |
| Zein – Deg – 0,75 HNTs | 75 | 25 | 0,75 |
| Zein – Deg – 1,00 HNTs | 75 | 25 | 1,00 |

Las mezclas obtenidas fueron procesadas mediante extrusión en un microcompounding Xplore 15 HT (Sittard, Países Bajos) a 130 °C, con una velocidad de husillo de 100 rpm y un tiempo de residencia aproximado de 1 min. A continuación, los materiales extruidos se conformaron por moldeo por microinyección utilizando una máquina Xplore IM 12 (Sittard, Países Bajos), operando a 130 °C y 8 bar, con la temperatura del molde controlada a 30 °C. Finalmente, las muestras moldeadas se almacenaron en condiciones controladas de 20 °C y 60% de humedad relativa (RH) hasta su posterior caracterización.

### Caracterización térmica de zeína con nanotubos de haloisita

El análisis térmico de las muestras fue analizado mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), utilizando un equipo DSC 25 TA Instruments (New Castle, EE. UU). Las muestras, con una masa aproximada de 5-8 mg, fueron colocadas en crisoles de aluminio de 40 µL.

El programa térmico aplicado consistió en tres etapas: un primer ciclo de calentamiento desarrollado en el rango de 20 °C a 150 °C, para eliminar efectos térmicos residuales derivados del procesamiento previo. Posteriormente, se efectuó un enfriamiento controlado hasta –80 °C, seguido de un segundo ciclo de calentamiento hasta 150 °C. Tanto la velocidad de calentamiento como la de enfriamiento se mantuvieron constantes en 10 °C/min. Durante todo el ensayo se trabajó bajo una atmósfera inerte de nitrógeno con un caudal de 50 mL/min, a fin de prevenir procesos de oxidación.

La evaluación de la degradación térmica de los materiales se llevó a cabo mediante análisis termogravimétrico (TGA), utilizando una termobalanza modelo TG-DSC2 suministrada por Mettler Toledo (Columbus, EE. UU). El procedimiento consistió en un programa de calentamiento controlado, desde 30 °C hasta 700 °C, con una velocidad constante de 10 °C/min, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno. Con el fin de asegurar la presición y la reproductibilidad de los resultados, cada ensayo se realizó por triplicado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades térmicas de zeína con haloisita

La Figura 1 muestra los termogramas obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) correspondientes a materiales termoplásticos basados en zeína, plastificados con dietilenglicol (DEG) y formulados con diferentes contenidos de nanotubos de haloisita (HNTs). Se evaluaron cinco composiciones con proporciones constantes de zeína (75%) y DEG (25%), mientras que la concentración de HNTs se incrementó progresivamente en el rango de 0 a 1 PHR.

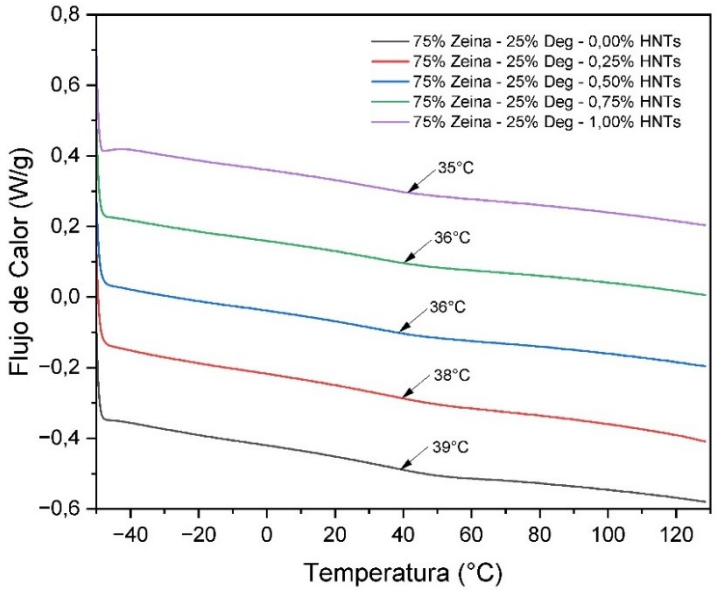



**Figura 1.** Termogramas DSC de formulaciones termoplásticas de zeína con diferentes proporciones de nanotubos de haloisita, plastificadas con dietilenglicol.

Los resultados muestran un comportamiento térmico similar en todas las formulaciones, caracterizado por una transición térmica ubicada aproximadamente entre 35 °C y 39 °C, atribuida a la temperatura de transición vítrea ($T_g$) del sistema termoplástico de zeína plastificada. La presencia de esta transición confirma que el dietilenglicol actuó eficazmente como plastificante, promoviendo una mayor movilidad de las cadenas poliméricas de la zeína y reduciendo su rigidez estructural.

Se observa que la formulación sin nanotubos de haloisita (0,00% HNTs) presenta la $T_g$ más alta, cercana a 39 °C. Sin embargo, a medida que aumenta el contenido de HNTs, la temperatura de transición vítrea disminuye gradualmente hasta alcanzar aproximadamente 35 °C en la formulación con 1,00% de HNTs. Esta reducción de la $T_g$ sugiere que los nanotubos de haloisita modifican la interacción intermolecular dentro de la matriz proteica, favoreciendo un incremento en la movilidad molecular del sistema.

En particular, revisiones recientes indican que los HNTs pueden actuar como refuerzos rígidos o como modificadores de movilidad molecular dependiendo de su dispersión, orientación y compatibilidad interfacial con la matriz polimérica, lo que influye directamente en la transición vítrea del sistema [9]. Además, se han reportado en nanocompuestos biopoliméricos que la acción combinada de nanofillers y plastificantes incrementa el volumen libre del sistema y reduce las interacciones proteína–proteína [5].

El comportamiento de degradación térmica de los materiales termoplásticos a base de zeína se ilustra en la Figura 2 mediante las curvas de termogravimetría (TGA) y sus correspondientes derivadas (DTG) para las distintas formulaciones estudiadas. La primera etapa, por debajo de 150 °C, corresponde a la evaporación de humedad residual y compuestos volátiles. La segunda etapa, entre aproximadamente 200 °C y 300 °C, se asocia con la degradación del plastificante y de componentes menos estables de la zeína. Finalmente, la principal pérdida de masa ocurre entre 320 °C y 400 °C, atribuida a la ruptura de las cadenas polipeptídicas de la matriz proteica.

Las curvas DTG muestran dos picos principales de degradación. El primero, alrededor de 250 °C, corresponde a la degradación inicial del sistema plastificado, mientras que el segundo, más intenso y cercano a 350 °C, representa la degradación principal de la zeína.

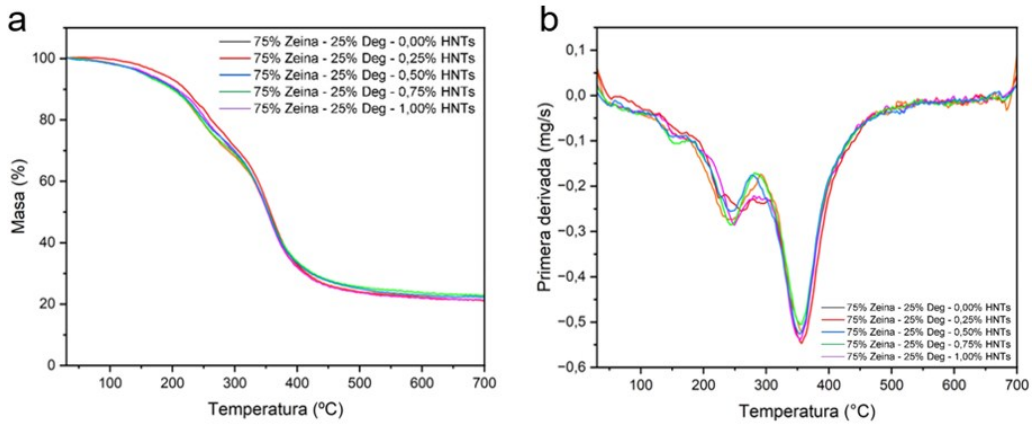



**Figura 2.** Curvas TGA (a) y DTG (b) de formulaciones termoplásticas de zeína con distintas proporciones de nanotubos de haloisita plastificadas con dietilenglicol (DEG).

Como se observa en las gráficas, la incorporación de HNTs genera un ligero desplazamiento de las temperaturas de degradación hacia valores mayores y una reducción moderada en la velocidad máxima de degradación, indicando una mejora en la estabilidad térmica del material. Este efecto se atribuye a la acción barrera y al refuerzo estructural proporcionado por los nanotubos. Además, las formulaciones con HNTs presentan un mayor residuo final a 700 °C debido a la naturaleza inorgánica y térmicamente estable de la haloisita.

Estos resultados coinciden con investigaciones recientes sobre nanocompuestos basados en zeína-HNTs, donde se reporta que la incorporación de haloisita mejora significativamente la estabilidad térmica de la matriz polimérica debido a la interacción interfacial entre la zeína y los nanotubos [3]. Asimismo, estudios sobre nanocompuestos poliméricos reforzados con HNTs han demostrado que incluso bajas concentraciones de estos nanotubos generan un incremento en la resistencia térmica y reducen la velocidad de degradación, debido a su alta estabilidad térmica y naturaleza aluminosilicada [9].

## CONCLUSIONES

El procesamiento de formulaciones termoplásticas de zeína plastificadas con dietilenglicol y reforzadas con nanotubos de haloisita mediante extrusión e inyección

permitió obtener materiales homogéneos con propiedades térmicas mejoradas. Los análisis por DSC evidenciaron que la incorporación de HNTs produjo una disminución gradual de la $T_g$, indicando un incremento en la movilidad molecular y modificaciones en las interacciones intermoleculares de la matriz proteica.

Por otra parte, los resultados obtenidos mediante TGA y DTG mostraron que la presencia de nanotubos de haloisita genera una mejora moderada en la estabilidad térmica del sistema, reflejada en el desplazamiento de las temperaturas de degradación hacia valores superiores y en la reducción de la velocidad máxima de degradación. Asimismo, las formulaciones reforzadas presentaron un mayor residuo final debido a la elevada estabilidad térmica y naturaleza inorgánica de la haloisita.

En conjunto, los resultados demuestran que los nanotubos de haloisita constituyen un refuerzo eficiente para matrices biodegradables basadas en zeína, favoreciendo el desarrollo de bioplásticos con mejores propiedades térmicas y potencial aplicación en materiales sostenibles y ambientalmente respetuosas.

## REFERENCIAS


[1] Alsadat-Seyedbokaei, Fahimeh; Felix, Manuel; *et al.* (2025). "Zein as a basis of green plastic materials: Modifications, applications, and processing". *International Journal of Biological Macromolecules*, p.p. 148287.

[2] Cheng, Kai; Du, Jin; *et al*. (2024). "Preparation and characterization of zein-based active packaging films integrated with TiO2 nanotube arrays". *Food packaging and shelf life, v.45*, p.p. 101348.

[3] Deshmukh, Ram; Kumar, Lokesh; *et al*. (2023). "Halloysite nanotubes for food packaging application: a review". *Applied Clay Science, v.234*, p.p. 106856.

[4] Kolluru, Shivanshu; Thakur, Abhiraj; *et al.* (2024). "Sustainable recycling of polymers: a comprehensive review". *Polymer Bulletin, v.81*, n. 11, p.p. 9569-9610.

[5] Kumar, Lokesh; Deshmukh, Ram; *et al.* (2024). "Halloysite nanotube as a functional material for active food packaging application: a review". *Food and Bioprocess Technology, v.17*, n. 1, p.p. 33-46.

[6] Pilapitiya Nayanathara; Ratnayake, Amila. (2024). "The world of plastic waste: A review". *Cleaner Materials, v.11*, p.p. 100220.

[7] Ritchie, Hannah. (2023). "How much plastic waste ends up in the ocean?". *Our World in Data.*

[8] Santana, Ismael; Felix, Manuel; *et al.* (2024). "Seaweed as basis of eco-sustainable plastic materials: focus on alginate". *Polymers, v.16*, n. 12, p.p. 1662.

[9] Wong, Li; Tan, Joash. (2024). "Halloysite nanotube-polymer nanocomposites: A review on fabrication and biomedical applications". *Journal of Manufacturing Processes, v.118*, p.p. 76-88.

[10] Xiao, FH; Wang, J; *et al.* (2022). "Influence of TiO2 nanoparticles on the performance and inner structure of zein/eugenol films". *Food packaging and shelf life, v.31*, p.p. 100782.

[11] Yaradoddi, Jayachandra; Banapurmath, Nagaraj; *et al.* (2020). "Biodegradable carboxymethyl cellulose based material for sustainable packaging application". *Scientific reports, v.10*, n. 1, p.p. 21960.

# Comunicación Integral y Multicanal: El Poder del 'Boca-Oreja' frente a la Saturación Digital en la Promoción de Estudiantes del Campus de Alcoy

**Mengual Vañó, José [(1)], Lara Jornet, Natxo [(2)], Lledó Montava, Rubén [(3)]**

*(1) Área de Comunicación, Campus de Alcoy, Universitat Politècnica de València, informate@epsa.upv.es*
*(2) Área de Comunicación, Campus de Alcoy, Universitat Politècnica de València, comunicacion@epsa.upv.es*
*(3) Área de Comunicación, Campus de Alcoy, Universitat Politècnica de València, prensa@epsa.upv.es*

## RESUMEN

En el contexto hiperconectado del siglo XXI, las instituciones universitarias compiten intensamente en el ecosistema digital para captar la atención de futuros estudiantes. Este artículo analiza la estrategia de comunicación del Campus de Alcoy de la Universitat Politècnica de València (UPV), evaluando la eficacia de las herramientas digitales frente a los canales de comunicación interpersonal tradicionales. A partir de una consulta realizada a 537 encuestas a estudiantes de nuevo ingreso de forma voluntaria en el curso 2025/2026. Los resultados revelan que, a pesar del enorme alcance del entorno transmedia (redes sociales, campañas programáticas e IA), la comunicación verbal 'boca-oreja' (word-of-mouth) sigue siendo el vector determinante en la decisión final de matriculación, representando el 51% del éxito total. El estudio concluye proponiendo un modelo de integración multicanal donde lo digital ejerce una función de atracción y adquisición de notoriedad, mientras que las acciones presenciales consolidan la confianza definitiva. El factor determinante de familiares y alumnos que estudiaron en etapas anteriores es crucial para decantarse para iniciar sus estudios universitarios en el Campus de Alcoy de la UPV.

**Palabras clave:** Estrategia Transmedia, Comunicación Verbal, Boca-Oreja, Campus de Alcoy, Captación, Modelo AIDA.

## INTRODUCCIÓN

La digitalización integral de los flujos de información ha reconfigurado por completo el paradigma de atracción y reclutamiento de alumnos en la educación superior [1]. Las universidades no solo compiten hoy en base a sus acreditaciones de calidad o cercanía geográfica, sino también en su capacidad de generar contenidos interactivos y orgánicos en plataformas transmedia y redes de gran consumo juvenil como Instagram, TikTok y YouTube [2]. Esta inercia exige destinar importantes recursos al despliegue de infraestructuras tecnológicas, optimización analítica y automatización conversacional basada en Inteligencia Artificial.

Sin embargo, esta presencia masiva en entornos virtuales ha generado un efecto secundario crítico: la infoxicación y la fatiga publicitaria digital en el segmento objetivo prioritario (jóvenes de entre 17 y 24 años). Ante la masificación de ofertas y mensajes institucionales homogéneos, emerge la necesidad imperiosa de rescatar el valor de la

dimensión humana de la comunicación. La comunicación interpersonal presencial, definida por su bidireccionalidad, empatía innata y transferencia honesta de vivencias el tradicional concepto de 'boca-oreja'. Además, se postula como el filtro definitivo de veracidad y confianza.

## OBJETIVOS

 **El nudo del problema:** Reside en el desequilibrio estratégico dentro de los planes de marketing universitarios actuales.

 **Focalización digital masiva:** Los esfuerzos conceptuales y presupuestarios se centran prioritariamente en maximizar métricas como impresiones, CTR o automatización conversacional bajo estructuras clásicas de conversión como el modelo AIDA (Atención, Interés, Deseo, Acción).

 **Infravaloración de lo analógico:** Se tiende a infravalorar sistemáticamente el peso real de la comunicación analógica y presencial de proximidad.

 **Contexto de la investigación:** El estudio se sitúa en el Campus de Alcoy de la UPV. Una ciudad de tamaño medio, marcada por un fuerte arraigo industrial y conexiones vecinales fuertemente consolidadas.

 **Laboratorio social idóneo:** Esta configuración permite contrastar si las dinámicas relacionales directas mantienen su hegemonía funcional frente al empuje transmedia y tecnológico global, analizando cómo coexisten la información en redes y el contacto cara a cara.

Para validar estas premisas de manera empírica, el Área de Comunicación del Campus de Alcoy estructuró una metodología cuantitativa descriptiva basada en sus registros internos centralizados [3]. Se diseñó y aplicó un cuestionario exhaustivo a los alumnos de nuevo ingreso matriculados en las titulaciones de grado y dobles grados del campus durante el periodo de matriculación. La muestra final analizada, quedó compuesta por 537 respuestas válidas, de los 881 alumnos de nuevo ingreso.

Un pilar analítico indispensable fue la modelización del 'Buyer Persona' del estudiante potencial del campus, sintetizando sus patrones motivacionales y barreras fundamentales:

- **Perfil sociodemográfico base:** Jóvenes estudiantes de entre 17 y 24 años, procedentes de manera prioritaria de las comarcas centrales y la Comunidad Valenciana, registrando asimismo un incremento gradual en alumnado de ámbito nacional.
- **Motivaciones determinantes:** Búsqueda de la excelencia que aporta un título oficial con el sello UPV [4], conjugado con las ventajas intrínsecas de un campus regional: seguridad, menores costes de vida e instalaciones no masificadas.
- **Puntos de dolor identificados:** Temor a la adaptación metodológica universitaria, incertidumbre respecto a la independencia residencial y una elevada preocupación por el índice de inserción laboral real de la titulación escogida.

## RESULTADOS

Con el perfil nítidamente delimitado, el campus implementa un ecosistema transmedia digital que se acopla a las fases de conversión del modelo AIDA, asistido por analítica predictiva y modelos de copia persuasivos optimizados con IA generativa, como se resume a continuación:

**Tabla 1.** Modelo AIDA

| Etapa AIDA | Canal Digital y Soporte Tecnológico | Propósito Operativo |
|---|---|---|
| **Atención (A)** | Instagram, TikTok y YouTube. Contenido audiovisual dinámico. | Ruptura del scroll y posicionamiento de marca en la mente del joven. |
| **Interés (I)** | Campañas programáticas segmentadas y micro-landings. | Captura de datos de contacto (leads) filtrando por áreas académicas. |
| **Deseo (D)** | Copys persuasivos mediante IA alineados con las dudas del perfil. | Asociar los beneficios del campus con la superación de sus puntos de dolor. |
| **Acción (A)** | E-mail marketing automatizado y chat directo de soporte. Newsletter. | Facilitar los trámites administrativos en los días de preinscripción. |

Los resultados de la explotación estadística contradicen la hipótesis de que el entorno puramente digital monopoliza la influencia comunicativa. Al mapear la variable 'Canal primario de conocimiento e influencia definitiva sobre el campus', la comunicación cara a cara y presencial sobresale de forma abrumadora.

La distribución porcentual de los canales de información declarados por el alumnado de nuevo ingreso se detalla en la siguiente tabla de frecuencias:

**Canal de Información Identificado** Porcentaje (%) Función de Impacto en el Embudo de Captación

**Recomendación de Amigos / Familia (Boca-Oreja)** 51,0% Fase de cierre. Transferencia directa de confianza e intangibles.

**Visitas institucionales a Centros de Secundaria** 10,8% Fase intermedia. Presencia física del campus en las aulas.

**Redes Sociales Colectivas (Instagram, TikTok)** 8,4% Fase de atracción. Descubrimiento visual y engagement estético.

**Otros Soportes (Web oficial, prensa, buscadores)** 29,8% Fase de soporte. Validación de datos técnicos y planes formativos.

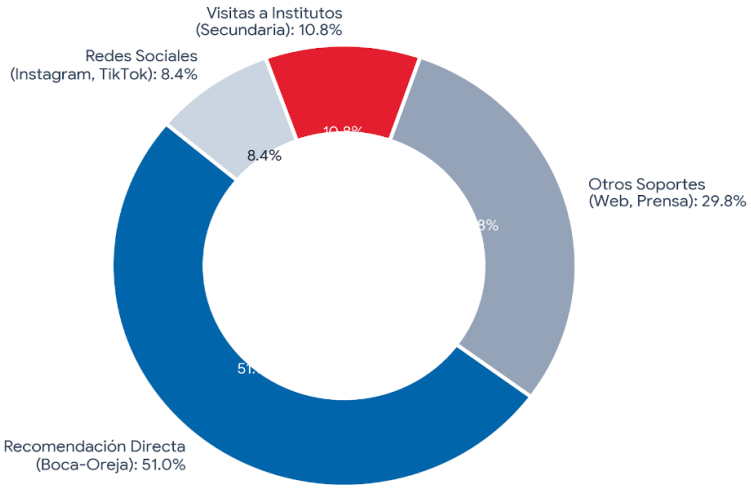



**Figura 1.** El peso decisivo del Boca - Oreja

En paralelo, la investigación profundizó en los factores intrínsecos que decantan la matrícula. El análisis descriptivo segmentó las respuestas en cuatro grandes dimensiones. La proximidad geográfica se posiciona como el factor principal (30,7%), un comportamiento lógico debido a la estructura de transporte y comodidad comarcal. La reputación y excelencia de la Marca UPV puntúa en segundo término con un 20,7%, respaldando la seguridad académica.

De manera crucial, la recomendación directa interpersonal (boca-oreja de antiguos alumnos) se sitúa inmediatamente después con un contundente 18,2%, superando de forma nítida al argumento económico (11,2%), el cual engloba la disponibilidad de becas o el coste del alquiler habitacional en Alcoy. Que la prescripción directa suponga el 51% del conocimiento y un 18,2% de la motivación de elección demuestra la solidez de la voz humana frente al anuncio digital.

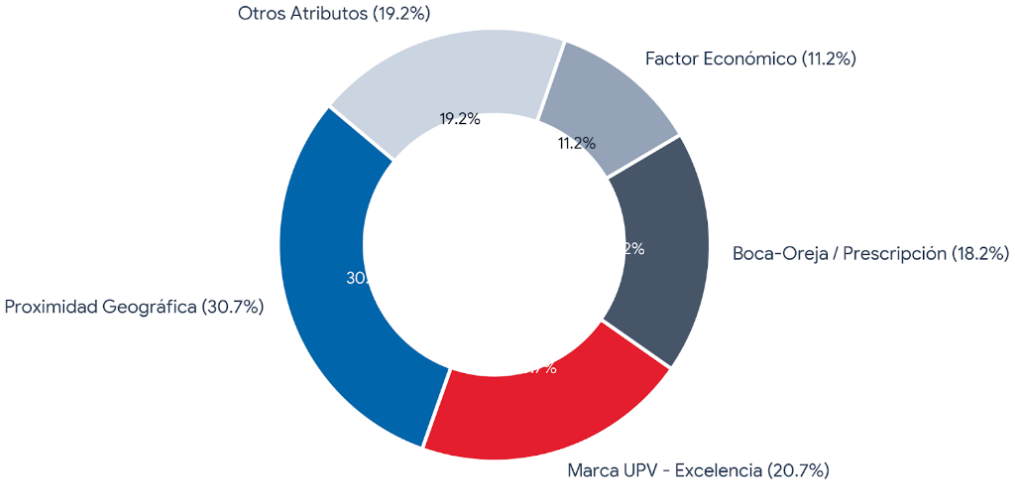



**Figura 2.** Variables motivacionales en la elección definitiva de matrícula.

La asimetría detectada entre el alcance digital y la conversión real invita a una lectura sociológica profunda del entorno de Alcoy. El diseño urbano y la idiosincrasia de una

ciudad mediana actúan como amplificadores naturales de la comunicación verbal. En comunidades cohesionadas, los círculos asociativos, familiares y laborales se cruzan de manera constante con la actividad del campus universitario.

Este fenómeno dota a la recomendación verbal de una inmunidad frente al escepticismo publicitario que los jóvenes aplican de forma sistemática en las redes sociales. Un alumno que relata una experiencia positiva, como la atención personalizada del profesorado, el equipamiento de los laboratorios o las facilidades de integración, genera un impacto cualitativo que ninguna campaña de branding digital automatizado es capaz de replicar con la misma tasa de fidelización. La cercanía del profesorado del campus hace que el estudiantado pueda realizar tutorías de una forma más relajada y sin presiones dentro de un ambiente distinguido.

Por lo tanto, la línea de acción idónea pasa por utilizar el músculo tecnológico digital para captar el volumen inicial, reconduciendo de inmediato dicho flujo de leads hacia experiencias de contacto directo en el campus. El Área de Comunicación cataliza el boca-oreja mediante tres eventos centrales de carácter estrictamente presencial:

- **Jornadas de Puertas Abiertas con Enfoque Familiar:** Encuentros donde padres y futuros universitarios exploran las instalaciones, dialogan cara a cara con directores de grado y desactivan miedos logísticos mediante la interacción humana horizontal. Cabe destacar que la presente actividad se complementa con las Jornadas de Puertas Abiertas a centros e institutos interesados. De esta manera, se consigue un trato más próximo y personalizado en su futura elección de grado universitario.

- **Semana Joven de la Ciencia y Divulgación Académica:** Es una macrorreunión anual que atrae físicamente a cientos de estudiantes preuniversitarios, permitiéndoles experimentar talleres interactivos y asimilar la identidad del campus in situ. La presente actividad ha sido absorbida por la JPA de centros educativos con el objetivo de personalizar y aprovechar al máximo la visita a nuestro campus.

- **Foro de Empleo y Matchmaking Empresarial:** Punto de encuentro físico donde el alumno constata de manera empírica la conexión del campus con directivos de recursos humanos de centenares de firmas industriales de la zona. Una oportunidad única y en primera persona para poder entregar su curriculum vitae y descubrir empresas de diferentes sectores.

## CONCLUSIONES

Esta investigación concluye que la comunicación en el siglo de la hipercomunicación, no responde a una lógica excluyente de suma cero entre lo virtual y lo físico, donde se impone el poder del algoritmo al factor humano, sea el trato convencional y directo como es el boca-oreja se recurra a que sea una fuente más fiable y efectiva. El éxito radica en una arquitectura híbrida donde cada canal asume el rol óptimo según la maduración del proceso de decisión del alumno.

Los canales digitales transmedia enriquecidos con IA y estructurados bajo el modelo AIDA son indispensables para proyectar el alcance a gran escala, capturar registros iniciales y generar posicionamiento visual. Resulta por tanto revelador que, la comunicación verbal boca-oreja y el contacto directo presencial siguen siendo las herramientas definitivas de conversión, confianza y fidelización.

En entornos de cercanía como el Campus de Alcoy, potenciar la dimensión humana e interpersonal de la marca universitaria UPV, constituye la estrategia de comunicación más sostenible y eficiente [5].

## REFERENCIAS

[1] Kotler, Philip; Keller, Kevin Lane (2016). "Marketing Management". 15ª ed. Upper Saddle River: Pearson Education. ISBN: 978 0 13 385646 0

[2] Kaplan, Andreas M.; Haenlein, Michael (2010). "Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media". Business Horizons, v. 53, n. 1, p.p. 59-68.

[3] Área de Comunicación del Campus de Alcoy (2025). "Informe Técnico Interno: Encuestas de Satisfacción y Perfil de Nuevo Ingreso (N=537)". Área de Comunicación. Campus de Alcoy: Universitat Politècnica de València.

[4] UPV (2024). "Memoria de Sostenibilidad y Datos Académicos del Campus d'Alcoi".https://www.upv.es

[5] Congreso Internacional SINERGIAS (2026). "Directrices para la presentación de comunicaciones orales y versión escrita en el libro de actas". En: II Congreso Internacional Creando Sinergias, Alcoy: UPV, p.p. 1-12.

# Reducción de la migración global en PLA plastificado con ésteres dibutílicos mediante extrusión reactiva

**Vicente-Vinas, Maria del Puig[(1)]*, Barrera, David[(1)], Montanes, Nestor[(1)], Garcia-Garcia, Daniel [(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoi, Alacant, España*
** E-mail: mavivia@upv.edu.es*

## RESUMEN

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los biopolímeros con mayor interés para el desarrollo de envases sostenibles, aunque su fragilidad limita sus aplicaciones en entornos que requieren flexibilidad. La plastificación con ésteres dibutílicos mejora la ductilidad, pero la migración del aditivo puede comprometer la estabilidad del material y su uso en contacto con alimentos.

En este trabajo se estudia la extrusión reactiva (REX) con peróxido de dicumilo (DCP) como estrategia para reducir la migración global en PLA plastificado con succinato de dibutilo (DBS), fumarato de dibutilo (DBF) y maleato de dibutilo (DBM). Las formulaciones incorporaron un 20% en peso de plastificante y, en las muestras reactivas, un 2% en peso de DCP. La migración se evaluó en simulantes A y C, etanol al 10% y 20% (v/v), durante 10 días a 40 °C.

PLA/DBF/DCP presentó la menor migración, con 35,8 mg $kg^{-1}$ en simulante A y 55,3 mg $kg^{-1}$ en simulante C, por debajo del límite de 60 mg $kg^{-1}$. Estos resultados muestran que la REX favorece la retención de plastificantes insaturados, especialmente DBF, y permite obtener materiales de PLA más estables para aplicaciones de envase alimentario sostenible.

**Palabras clave**: PLA, extrusión reactiva, migración global, plastificantes dibutílicos, fumarato de dibutilo, maleato de dibutilo, simulantes alimentarios, envase sostenible.

## INTRODUCCIÓN

El PLA es un poliéster termoplástico alifático de origen renovable y biodegradable, ampliamente estudiado para aplicaciones de envase, agricultura, biomateriales y fabricación aditiva [4]. A pesar de estas ventajas, su elevada rigidez, baja resistencia al impacto y reducida elongación a rotura limitan su empleo cuando se requieren materiales flexibles o con mayor tenacidad.

Una vía habitual para superar estas limitaciones consiste en incorporar plastificantes capaces de reducir las interacciones intermoleculares entre cadenas, aumentar el volumen libre y favorecer la movilidad segmentaria [3; 4] . Sin embargo, la mejora inicial de propiedades no garantiza por sí sola la estabilidad del material durante el uso. Si el aditivo migra hacia el medio de contacto, pueden aparecer pérdidas de prestaciones, cambios superficiales y, en aplicaciones alimentarias, problemas de cumplimiento normativo.

Dentro de esta aproximación, los ésteres dibutílicos de ácidos dicarboxílicos son una familia de plastificantes de interés para PLA. Su estructura permite comparar el efecto de la saturación: el DBS es un éster saturado, mientras que DBF y DBM incorporan un

doble enlace C=C con configuraciones trans y cis, respectivamente[3]. Esta diferencia puede afectar tanto a la compatibilidad con la matriz como a la participación del plastificante en reacciones radicalarias durante el procesado.

La extrusión reactiva con peróxidos ofrece una vía de modificación en fundido, sin disolventes y compatible con procesos industriales [2; 5]. En presencia de plastificantes insaturados, los radicales generados por el DCP pueden favorecer reacciones de anclaje, ramificación o formación parcial de red, con la consiguiente restricción de la movilidad del plastificante, pero sin anular necesariamente su efecto flexibilizante.

En materiales destinados a contacto alimentario, la migración global es un parámetro especialmente útil en fases tempranas de desarrollo, porque cuantifica la transferencia total de sustancias no volátiles desde el material hacia un simulante bajo condiciones normalizadas. El Reglamento (UE) n.º 10/2011 establece un límite general de migración global de 10 mg $dm^{-2}$, equivalente en la práctica a 60 mg $kg^{-1}$ cuando los resultados se expresan por masa de alimento o simulante. Por ello, la comparación entre formulaciones debe complementarse con la referencia a este umbral.

## OBJETIVOS

El objetivo de esta comunicación es evaluar el efecto de la extrusión reactiva con DCP sobre la migración de plastificantes en formulaciones de PLA modificadas con ésteres dibutílicos. Para ello se compara el comportamiento de un plastificante saturado, DBS, con dos plastificantes insaturados, DBF y DBM. El propósito es determinar si la presencia de dobles enlaces favorece la retención del aditivo en la matriz polimérica y mejora la viabilidad de estas formulaciones para envases sostenibles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó PLA comercial Ingeo™ 2003D como matriz polimérica. Como plastificantes se emplearon succinato de dibutilo (DBS), fumarato de dibutilo (DBF) y maleato de dibutilo (DBM), todos ellos incorporados al 20% en peso. Para estudiar el efecto de la extrusión reactiva, se prepararon formulaciones análogas con un 2% en peso de peróxido de dicumilo (DCP).

Las formulaciones se diseñaron para comparar el efecto de la estructura del plastificante y de la REX sobre la migración global. La serie no reactiva incluyó PLA plastificado con DBS, DBF o DBM, identificada como PLA/DBS, PLA/DBF y PLA/DBM. La serie reactiva incorporó DCP a esas mismas composiciones, dando lugar a PLA/DBS/DCP, PLA/DBF/DCP y PLA/DBM/DCP. También se procesó PLA sin plastificante como referencia, lo que permitió diferenciar la contribución de la matriz de la asociada a cada sistema plastificante.

Las mezclas se procesaron por extrusión en fundido en una extrusora de doble husillo, ajustando las condiciones de temperatura y tiempo de remanencia en función de la presencia de DCP. Posteriormente, el material se inyectó para obtener probetas normalizadas. Este diseño experimental permitió comparar, para cada plastificante, el sistema plastificado convencional y su formulación análoga sometida a REX.

La migración global se evaluó en simulantes alimentarios tipo A y C, correspondientes a etanol al 10% y 20% (v/v), respectivamente. Las probetas se mantuvieron en contacto con el simulante a 40°C durante 10 días. Tras el ensayo, se determinó la pérdida de masa y la migración global expresada en mg $kg^{-1}$. De forma complementaria, se

emplearon resultados de FTIR, TGA, ensayos mecánicos y colorimetría para interpretar la relación entre estructura química, retención del plastificante y propiedades finales.

La selección de los simulantes A y C permite analizar el comportamiento de las formulaciones frente a medios hidroalcohólicos con diferente capacidad extractiva. El simulante A, etanol al 10%, se emplea para alimentos hidrofílicos, mientras que el simulante C, etanol al 20%, presenta mayor afinidad por especies orgánicas de baja masa molar [6]. Esta comparación permite valorar si la extrusión reactiva reduce la pérdida de plastificante solo en condiciones moderadas o si mantiene su efecto en un medio más exigente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre los sistemas plastificados muestra que la migración depende de la estructura química del éster y no únicamente de su miscibilidad inicial con el PLA. En ausencia de DCP, todos los plastificantes migraron de forma apreciable, aunque los sistemas insaturados presentaron valores inferiores al DBS. En simulante A, PLA/DBS alcanzó 154,3 mg $kg^{-1}$, mientras que PLA/DBF y PLA/DBM se situaron en 103,2 y 114,4 mg $kg^{-1}$, respectivamente. Esta diferencia apunta a una interacción más favorable de los plastificantes insaturados con la matriz, posiblemente asociada al doble enlace y a una mejor acomodación molecular.

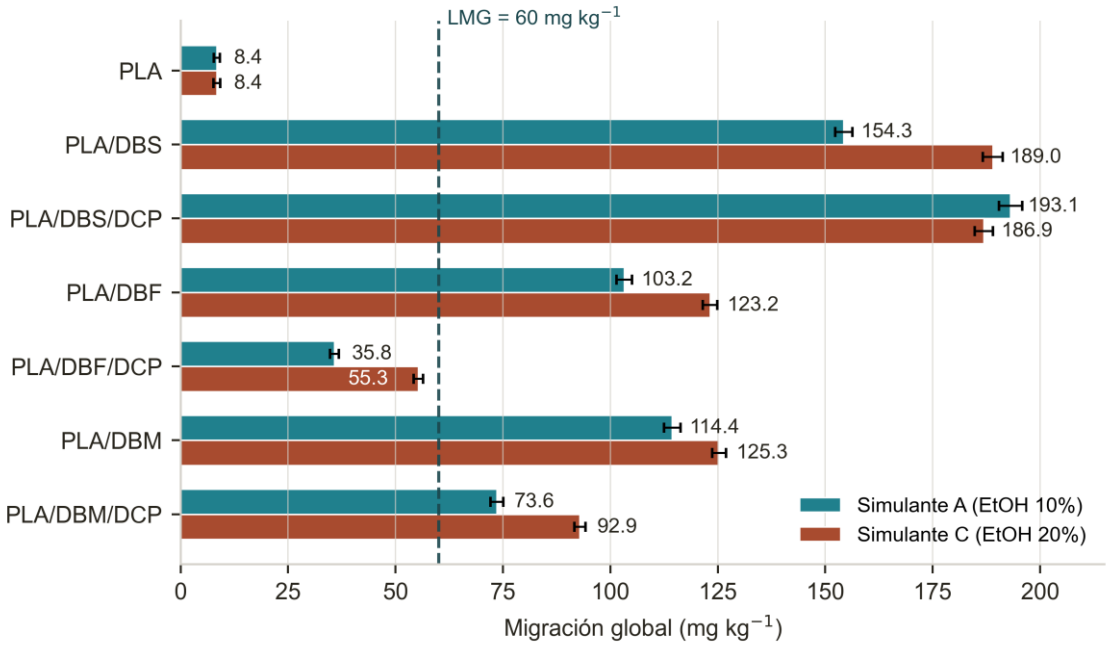



**Figura 1**. Migración global de PLA y formulaciones plastificadas con DBS, DBF y DBM, con y sin extrusión reactiva, en simulantes alimentarios A y C. Las barras representan la media y las barras de error la desviación estándar. La línea discontinua indica el límite de migración global de 60 mg $kg^{-1}$.

El efecto de la REX dependió de forma clara de la presencia de insaturación. En el sistema saturado, la incorporación de DCP no redujo la migración; por el contrario, PLA/DBS/DCP presentó 193,1 mg $kg^{-1}$ en simulante A. Este comportamiento indica que, en ausencia de dobles enlaces reactivos en el plastificante, el peróxido actúa principalmente sobre la matriz de PLA y puede inducir fenómenos competitivos de

ramificación, entrecruzamiento limitado o escisión de cadena que no favorecen la retención del aditivo.

Por el contrario, las formulaciones con DBF y DBM respondieron positivamente a la extrusión reactiva. PLA/DBF/DCP redujo la migración en simulante A hasta 35,8 mg $kg^{-1}$, lo que supone una disminución aproximada del 65 % respecto a PLA/DBF. PLA/DBM/DCP también mostró una reducción notable, hasta 73,6 mg $kg^{-1}$. En simulante C, más extractivo por su mayor contenido en etanol, se mantuvo la misma tendencia: PLA/DBF/DCP alcanzó 55,3 mg $kg^{-1}$ frente a 123,2 mg $kg^{-1}$ para PLA/DBF, y PLA/DBM/DCP alcanzó 92,9 mg $kg^{-1}$ frente a 125,3 mg $kg^{-1}$ para PLA/DBM.

Si se toma como referencia el límite de migración global de 60 mg $kg^{-1}$ para resultados expresados por masa de alimento o simulante, únicamente PLA y PLA/DBF/DCP quedaron por debajo de dicho umbral en ambos simulantes. Este resultado refuerza el interés de PLA/DBF/DCP, ya que combina una migración reducida con el mantenimiento de propiedades mecánicas adecuadas.

La reducción observada en PLA/DBF/DCP es especialmente relevante porque se mantiene en los dos simulantes evaluados. En el simulante A, el valor final de 35,8 mg $kg^{-1}$ queda claramente por debajo del umbral normativo de referencia; en el simulante C, el valor de 55,3 mg $kg^{-1}$ se aproxima al límite, pero permanece dentro del rango aceptable. Este comportamiento sugiere que la REX no solo mejora la retención en condiciones de baja extractividad, sino que conserva su eficacia en un medio hidroalcohólico más agresivo.

Estos resultados apoyan la hipótesis de que el doble enlace C=C de DBF y DBM participa en reacciones radicalarias promovidas por el DCP durante la extrusión. Como consecuencia, una fracción del plastificante quedaría anclada o más fuertemente asociada a la matriz, reduciendo su difusión hacia el medio externo. La mayor eficacia del DBF podría relacionarse con su configuración trans, que favorece una disposición molecular más lineal y, posiblemente, una mayor accesibilidad del doble enlace durante la reacción.

Esta interpretación es coherente con los resultados de FTIR, en los que se observó una ligera disminución de las bandas asociadas a insaturaciones tras la REX en las formulaciones con DBF y DBM. Del mismo modo, los resultados térmicos mostraron una mejora de la estabilidad inicial en los sistemas insaturados reactivos: en PLA/DBF/DCP la temperatura asociada al 5% de pérdida de masa aumentó de 198,8 °C a 261,0 °C, y en PLA/DBM/DCP de 200,2 °C a 232,8 °C. Esta mejora sugiere una menor pérdida temprana de plastificante durante el calentamiento.

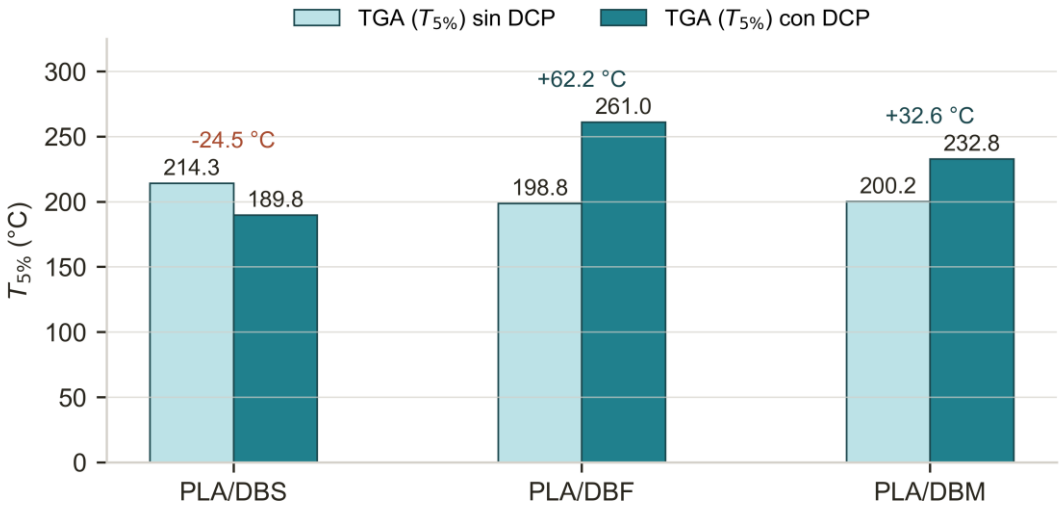



**Figura 2**. Comparación de la temperatura asociada al 5% de pérdida de masa ($T_{5\%}$) determinada por TGA en las formulaciones con DBS, DBF y DBM con y sin extrusión reactiva. El aumento de $T_{5\%}$ en los sistemas insaturados evidencia una menor pérdida temprana de plastificante durante el calentamiento.

Desde el punto de vista funcional, la reducción de la migración no implicó una pérdida completa de ductilidad. Las formulaciones PLA/DBF/DCP y PLA/DBM/DCP mantuvieron elongaciones a rotura superiores al 250 %, junto con una mejora relativa de la resistencia a tracción respecto a sus sistemas no reactivos. Además, PLA/DBF/DCP presentó una variación de color moderada, con ΔE* = 2,4, inferior a la observada en PLA/DBS/DCP. Por tanto, la formulación con DBF y DCP ofrece el balance más favorable entre flexibilización, estabilidad térmica, baja migración y apariencia visual.

Desde el punto de vista del diseño de materiales, estos resultados indican que la selección del plastificante debe considerar de forma conjunta el efecto mecánico inicial y su permanencia en la matriz. Un plastificante muy eficiente, pero fácilmente extraíble, puede generar materiales con buenas propiedades a corto plazo y comportamiento inestable durante el almacenamiento o el uso. En cambio, la combinación DBF/DCP reduce la fracción móvil sin eliminar la capacidad plastificante, lo que resulta más adecuado para aplicaciones donde la durabilidad y el cumplimiento normativo son requisitos esenciales.

La comparación con PLA/DBM/DCP permite, además, distinguir el efecto de la insaturación de la influencia de la geometría molecular. Aunque DBM contiene un doble enlace, su configuración cis podría favorecer una estructura más compacta o menos accesible durante la reacción radicalaria, limitando el grado de fijación alcanzado durante la extrusión. Esta diferencia explicaría que PLA/DBM/DCP reduzca la migración respecto a PLA/DBM, pero no alcance los valores obtenidos con PLA/DBF/DCP.

## IMPLICACIONES PARA ENVASE ALIMENTARIO

La inclusión de una referencia normativa en el análisis permite identificar con mayor claridad qué formulaciones podrían tener interés aplicado. En la Figura 1, la línea de 60 mg $kg^{-1}$ muestra que la mejora obtenida con DBF/DCP no es solo relativa respecto al material no reactivo, sino que sitúa la migración global por debajo del umbral empleado cuando los resultados se expresan en masa de simulante. Esta lectura es especialmente

relevante en materiales plastificados, donde la pérdida de aditivo suele ser uno de los principales factores limitantes.

El hecho de que PLA/DBF/DCP cumpla este criterio tanto en simulante A como en simulante C indica que la reducción de migración se mantiene al aumentar la capacidad extractiva del medio. Este aspecto es importante porque los ensayos con simulantes hidroalcohólicos no solo evalúan la transferencia hacia medios acuosos, sino también la susceptibilidad del material frente a medios capaces de solubilizar especies orgánicas de baja masa molar [1]. Así, el comportamiento de PLA/DBF/DCP apunta a una mayor estabilidad composicional en condiciones de contacto más exigentes.

Desde la perspectiva del procesado, la REX presenta la ventaja de integrarse en operaciones convencionales de extrusión, evitando etapas adicionales de modificación química en disolución. Esta aproximación es coherente con los principios de intensificación de proceso y química más sostenible, ya que la reacción se produce durante la transformación del material y puede ser compatible con líneas de compounding o producción de lámina. La posibilidad de obtener materiales más estables mediante una modificación en fundido aumenta el interés de esta estrategia para su escalado. No obstante, el cumplimiento del límite de migración global debe considerarse una primera etapa de evaluación. Para una validación completa en contacto alimentario sería necesario estudiar la migración específica de los plastificantes, la posible formación de subproductos derivados del DCP y la estabilidad del material durante almacenamiento prolongado. Estos ensayos permitirían diferenciar la reducción de migración atribuible a una mayor retención química de la asociada a cambios morfológicos o físicos de la matriz.

## CONCLUSIONES

La extrusión reactiva con DCP es una estrategia eficaz para reducir la migración de plastificantes en PLA cuando el aditivo presenta insaturaciones capaces de participar en reacciones radicalarias durante el procesado. La comparación entre DBS, DBF y DBM confirma que la estructura química del plastificante es determinante: el sistema saturado no mejora su retención tras la REX, mientras que los sistemas insaturados reducen de forma notable la migración global.

Entre las formulaciones estudiadas, PLA/DBF/DCP mostró el comportamiento más equilibrado, con los menores valores de migración en ambos simulantes, mejora de la estabilidad térmica inicial, mantenimiento de una elevada ductilidad y cambios de color moderados. Estos resultados sitúan al fumarato de dibutilo combinado con extrusión reactiva como una alternativa prometedora para desarrollar materiales de PLA plastificados con mayor estabilidad funcional y potencial aplicación en envases sostenibles.

Como trabajo futuro, convendría complementar la migración global con estudios de migración específica de los plastificantes y de posibles subproductos de reacción, así como con ensayos de envejecimiento y almacenamiento en condiciones reales. Esta información permitiría confirmar la estabilidad de las formulaciones reactivas y avanzar hacia su validación en aplicaciones de contacto alimentario.

## REFERENCIAS

# Optimización de la producción en Industria 4.0: planificación dinámica basada en el estado de las máquinas

**Agud-Albesa, Lucía [(1)], Garrido, Neus [(2)], López-Rodríguez, Daniel [(1)], Oltra-Crespo, Sandra [(3)], Juan, Ángel A. [(4)]**

(1) *Departamento de Matemática Aplicada (Universitat Politècnica de València, 03801 Alcoy, España, lagudal@mat.upv.es, dalorod@upv.es)*

(2) *Instituto de Matemática Multidisciplinar (Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, España, neugarsa@mat.upv.es)*

(3) *Instituto Tecnológico de Informática (Universitat Politècnica de València, 03801 Alcoy, España, soltra@mat.upv.es)*

(4) *CIGIP - ValgrAI (Universitat Politècnica de València, 03801 Alcoy, España); UNIE Universidad (Av. Monforte de Lemos 28, 28029 Madrid, España, ajuanp@upv.es)*

## RESUMEN

Este trabajo aborda la planificación de la producción en fábricas inteligentes en el contexto de la Industria 4.0, donde los sistemas productivos están altamente digitalizados y sensorizados. Se propone un modelo avanzado del problema *Flow Shop* en el que los tiempos de procesamiento dependen del estado térmico de las máquinas y captura efectos de degradación dinámicos. La metodología combina heurísticas con evaluación dinámica basada en variables físicas del sistema, como la temperatura. Los resultados evidencian mejoras significativas frente a métodos tradicionales, lo que reduce el tiempo total de producción y aumenta la robustez operativa. El enfoque presentado permite diseñar sistemas de planificación más adaptativos, realistas y eficientes en entornos industriales avanzados.

**Palabras clave:** PFSP, Industria 4.0, EDOs, algoritmo NEH, métodos de aleatorización sesgada.

## INTRODUCCIÓN

En el contexto de la Industria 4.0, las fábricas inteligentes se caracterizan por la integración de sistemas ciberfísicos, sensores IoT y plataformas de análisis de datos en tiempo real. Estos sistemas permiten monitorizar continuamente el estado de los recursos productivos y generan grandes volúmenes de información que pueden utilizarse para mejorar la toma de decisiones operativas.

Uno de los problemas clave en este ámbito es la planificación de la producción, especialmente en entornos tipo Flow Shop (FS), donde múltiples trabajos deben procesarse en serie en distintas máquinas. En aplicaciones reales como líneas de mecanizado automatizadas, sistemas de fabricación aditiva o plantas de ensamblaje robotizadas, el rendimiento de las máquinas no es constante, sino que depende de factores como la temperatura, la carga acumulada o la intensidad de uso. Por ejemplo, en una *smart factory* de mecanizado, los sensores térmicos pueden detectar aumentos de temperatura en husillos o herramientas, lo que provoca cambios en la velocidad de procesamiento. Ignorar esta información puede conducir a planes de producción poco realistas.

Este trabajo propone integrar estas dinámicas directamente en el modelo de *scheduling*, con el objetivo de generar soluciones adaptativas alineadas con el paradigma de

fabricación inteligente. Para ello, se consideran tres formas distintas de calcular el *makespan*, que permiten analizar el impacto de incorporar dinámicas internas de las máquinas en el proceso de planificación: se considera un escenario con tiempos de procesamiento estáticos, otro con tiempos de procesamiento variables y, por último, un escenario que aplica tiempos dinámicos a la secuencia del escenario estático.

## ESTADO DEL ARTE

El *Flow Shop Problem* (FSP) es uno de los problemas clásicos más relevantes en el ámbito de la investigación operativa y la ingeniería de producción. Este problema consiste en determinar la secuencia óptima en la que un conjunto de $n$ trabajos debe ser procesado en una serie de $m$ máquinas dispuestas en línea, de modo que todos los trabajos siguen el mismo orden en cada máquina. El objetivo más habitual es minimizar el makespan, es decir, el tiempo total necesario para completar todos los trabajos.

El *Permutation Flow Shop Scheduling Problem* (PFSP) constituye una generalización del problema de FSP tradicional, con la restricción de mantener la misma secuencia en todas las máquinas, lo que reduce significativamente el espacio de búsqueda, pasando de $(n!)^m$ a $n!$, sin eliminar su complejidad combinatoria. De hecho, el problema es *NP-hard* para el caso general, lo que implica que no existe un método exacto eficiente para resolver instancias de gran tamaño en tiempos razonables.

Debido a esta complejidad, gran parte de la literatura se ha centrado en el desarrollo de métodos heurísticos y metaheurísticos capaces de generar soluciones de alta calidad en tiempos computacionales reducidos [1]. Entre las heurísticas clásicas destaca el algoritmo NEH (Nawaz-Enscore-Ham [2]), ampliamente reconocido por su buen rendimiento en términos de calidad de solución frente a coste computacional. Este método constructivo ordena inicialmente los trabajos en función de su carga total y construye la secuencia óptima de manera iterativa mediante inserciones.

A partir de este punto, numerosos trabajos han propuesto extensiones del PFSP con el objetivo de aproximar mejores condiciones reales de producción. Una de las principales líneas de investigación ha consistido en introducir tiempos de procesamiento dependientes del tiempo o de la posición en la secuencia. En estos modelos, conocidos como problemas de deterioro o aprendizaje, los tiempos pueden aumentar o disminuir en función del orden en que se procesan los trabajos. Aunque estas aproximaciones aportan mayor realismo, la evolución de los tiempos suele definirse de forma exógena, sin dependencia directa del estado del sistema.

Otra línea relevante es la consideración de la incertidumbre en los tiempos de procesamiento mediante modelos estocásticos [3]. En este contexto, los enfoques simheurísticos combinan optimización y simulación para evaluar el comportamiento de las soluciones en distintos escenarios. Estos métodos permiten capturar la variabilidad, pero siguen tratando los cambios en el sistema como factores externos.

Más recientemente, el auge de la Industria 4.0 ha impulsado el desarrollo de modelos de planificación más dinámicos e integrados con datos en tiempo real. En este nuevo paradigma, los sistemas productivos están equipados con sensores que permiten monitorizar continuamente el estado de las máquinas, lo que abre la puerta a enfoques en los que los tiempos de procesamiento dependen directamente de variables internas como la temperatura, el desgaste o el consumo energético.

Sin embargo, la integración explícita de estas dinámicas en el PFSP sigue siendo limitada. La mayoría de los modelos existentes no consideran la retroalimentación entre

las decisiones de planificación y la evolución del sistema. Este vacío motiva el desarrollo de nuevos enfoques en los que la planificación no solo responde a condiciones iniciales, sino que interactúa de forma continua con el comportamiento del sistema, permitiendo obtener soluciones más robustas, adaptativas y alineadas con las necesidades de la producción moderna.

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el enfoque clásico del PFSP, una secuencia de $n$ trabajos debe pasar por $m$ máquinas. Se asume que los tiempos de procesamiento de cada trabajo $j$ en cada máquina $i$, $p_{ij}^{0}$, son constantes y conocidos de antemano. Bajo esta hipótesis, el *makespan* se obtiene considerando únicamente las restricciones tecnológicas del sistema: cada máquina procesa un único trabajo a la vez, cada trabajo debe pasar secuencialmente por todas las máquinas y no se permiten interrupciones.

El cálculo del *makespan* en un escenario estático se realiza determinando los tiempos de finalización de cada operación en función de dos factores: la disponibilidad de la máquina y la finalización previa del trabajo en la máquina anterior. Este enfoque representa una planificación idealizada en la que el comportamiento de las máquinas no varía durante la ejecución. Como resultado, el *makespan* obtenido puede considerarse una estimación optimista, ya que no tiene en cuenta posibles efectos de degradación o variabilidad en el rendimiento.

En el modelo aquí propuesto, el estado interno de cada máquina no es estático, sino que evoluciona dinámicamente en función de su temperatura de operación. En particular, se asume que dicha temperatura sigue la ley de enfriamiento de Newton, lo que permite describir su evolución temporal mediante la siguiente ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dT_i}{dt} = -\kappa_i \left( T_i(t) - T^{\text{amb}} \right) + \lambda_i e_i \ , \qquad i = 1, 2, \dots, m,$$

donde $T_i(t)$ representa la temperatura de la máquina $i$ en el instante $t$, $\kappa_i > 0$ y $\lambda_i > 0$ son el coeficiente de enfriamiento y de calentamiento, respectivamente, propios de la máquina $i$, $T^{\text{amb}}$ es la temperatura ambiente y $e_i$ indicará el estado térmico de la máquina, si está en reposo o en funcionamiento. En la Figura 1 se muestra el proceso descrito de forma gráfica.

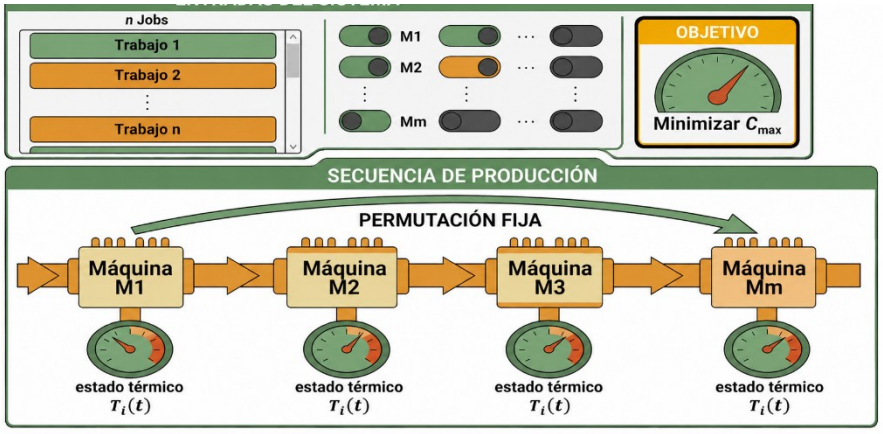



**Figura 1.** Esquema del proceso

Esta dinámica térmica tiene un impacto directo en el rendimiento del sistema. En concreto, se asume que los tiempos de procesamiento de los trabajos se ven penalizados cuando la temperatura de la máquina aumenta. Así, el tiempo efectivo de procesamiento del trabajo $j = 1,2,\dots,n$, en la máquina $i = 1,2,\dots,m$, pasa a depender de la temperatura según:

$$p_{ij}^{t} = p_{ij}^{0} \cdot \varphi\big(T_i(t)\big)\,,$$

donde $\varphi(\cdot)$ es una función de penalización creciente que captura el efecto adverso del incremento de temperatura sobre la eficiencia de la máquina. Una posible elección para esta función es:

$$\varphi\big(\,T_i(t)\big) = \,1\, +\, \alpha\, \cdot\, max\,\{\,0\,, T_i(t) - \,T^{\mathrm{amb}}\,\},$$

donde $\alpha \geq 0$ es un parámetro que mide la sensibilidad del tiempo de procesamiento frente a variaciones térmicas.

En este trabajo, el estado térmico de cada máquina evoluciona de forma continua a lo largo del tiempo y está influido por dos procesos principales: calentamiento ($e_i = 1$), cuando la máquina está en funcionamiento, y enfriamiento ($e_i = 0$), durante periodos de inactividad. El *makespan* dinámico se calcula teniendo en cuenta esta evolución. Este procedimiento introduce una dependencia directa entre el orden de la secuencia de trabajos y el comportamiento del sistema, generando un proceso de retroalimentación: la planificación influye en el estado de las máquinas y este, a su vez, afecta los tiempos de procesamiento posteriores.

Como consecuencia, el *makespan* dinámico suele ser significativamente mayor que el estático, lo que refleja de forma más realista las condiciones operativas del sistema. Con el objetivo de analizar el impacto de ignorar las dinámicas del sistema, se considera una tercera medida: la evaluación dinámica de una secuencia obtenida bajo hipótesis estáticas. En este caso, se procede en dos etapas. En primer lugar, se genera la secuencia con el modelo clásico. Posteriormente, se evalúa dicha secuencia aplicando el modelo dinámico descrito anteriormente. El *makespan* resultante permite cuantificar la degradación del rendimiento cuando una solución aparentemente óptima en un entorno estático se ejecuta en condiciones reales.

## RESULTADOS

Para la validación del modelo se emplearon las instancias de referencia propuestas por Taillard [4], ampliamente utilizadas en FSP. En particular, se muestran a continuación los resultados obtenidos en uno de los casos con 5 máquinas y 20 trabajos, comparando tres escenarios: tiempos de procesamiento estáticos (Figura 2), tiempos de procesamiento dinámicos (Figura 3), y aplicación de los tiempos dinámicos sobre la secuencia obtenida en el modelo estático (Figura 4).

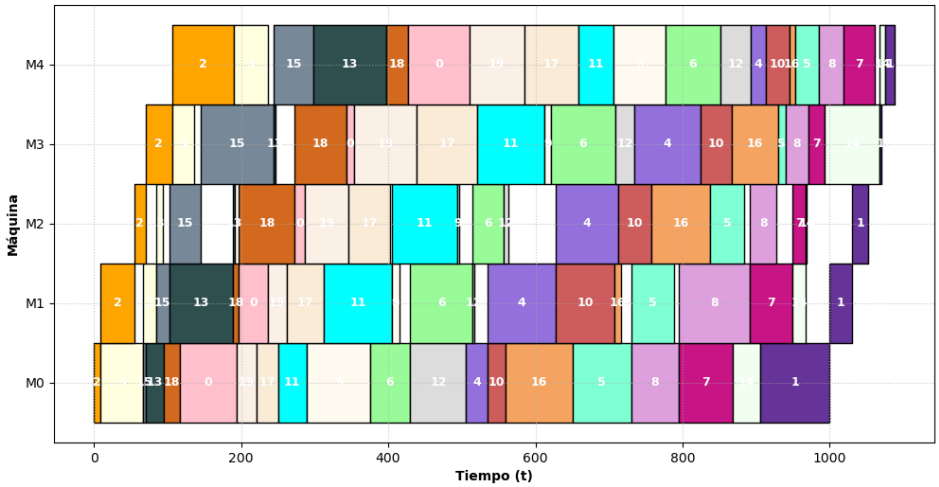



**Figura 2**. Diagrama de Gantt para 20 trabajos y 5 máquinas con tiempos de procesamiento estáticos. *Makespan*: 1098

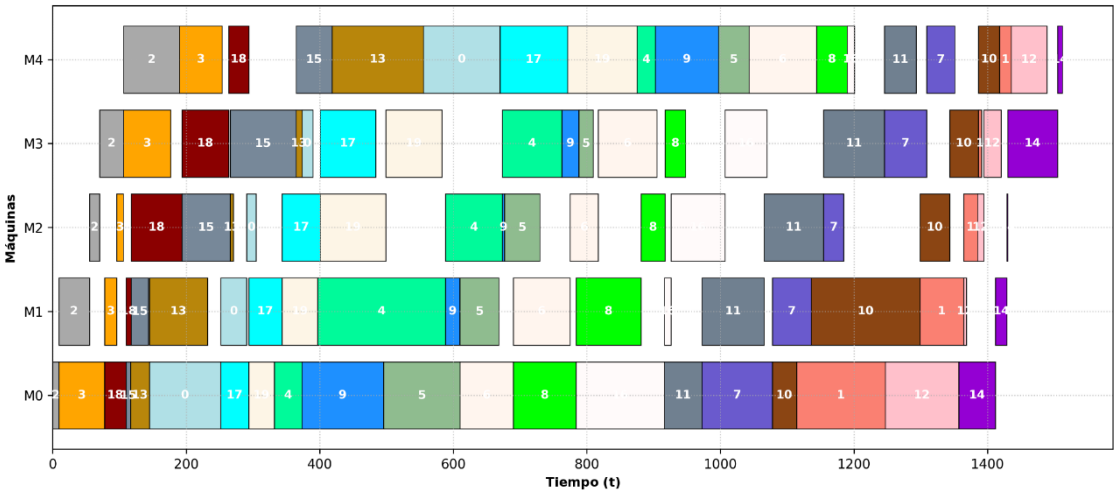



**Figura 3**. Diagrama de Gantt para 20 trabajos y 5 máquinas con tiempos de procesamiento dinámicos. *Makespan*: 1512,78

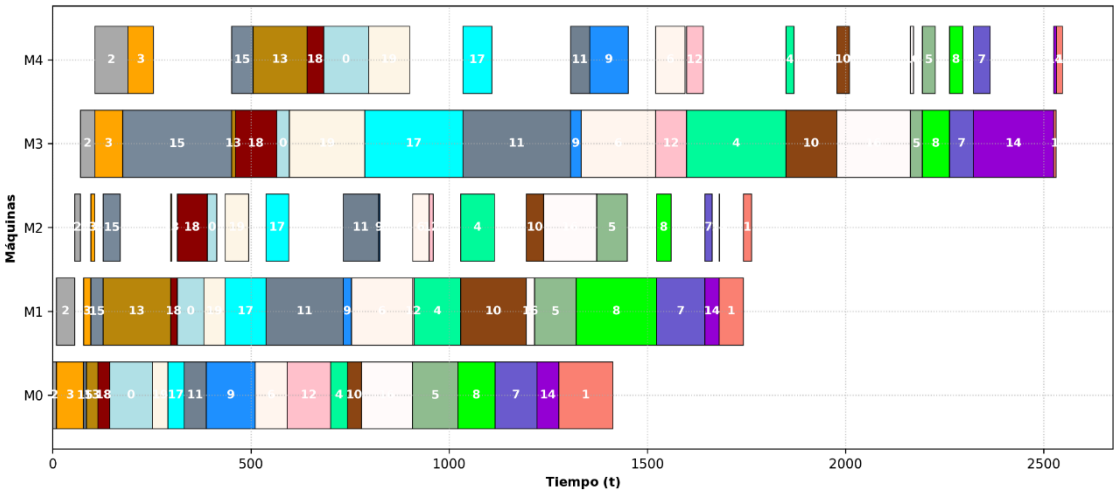



**Figura 4**. Diagrama de Gantt para 20 trabajos y 5 máquinas con tiempos de procesamiento dinámicos y ordenamiento según el modelo estático. *Makespan*: 2546,7

Los diagramas de Gantt permiten observar el efecto de la reordenación dinámica de las tareas. En el caso estático, el *makespan* obtenido es de 1098, un valor que representa una estimación optimista al no considerar la evolución térmica de las máquinas. Al introducir tiempos de procesamiento dinámicos y adaptar la secuencia al estado del sistema, el *makespan* aumenta a 1512,78, lo que refleja un comportamiento más realista. Sin embargo, si se mantiene el orden obtenido con el modelo estático y únicamente se aplican los tiempos dinámicos derivados de la temperatura, el *makespan* asciende a 2546,7. Por tanto, la planificación dinámica reduce el tiempo total en 1033,92 unidades de tiempo, lo que supone una mejora aproximada del 40,6% respecto a ejecutar la secuencia estática de forma dinámica. Estos resultados muestran que no basta con recalcular los tiempos de proceso: el orden de las tareas debe adaptarse al estado térmico de las máquinas para mejorar la eficiencia global.

Los experimentos muestran que los modelos estáticos pueden subestimar el *makespan* en más del 50% al considerar efectos térmicos. Esto demuestra la necesidad de integrar las dinámicas internas en la planificación.

El modelo propuesto redistribuye la carga de trabajo evitando sobrecalentamientos, lo que permite mejoras del 25% al 35% en el tiempo total de producción.

Además, las soluciones obtenidas presentan una variabilidad menor, lo que mejora la robustez del sistema y la fiabilidad en entornos industriales.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son coherentes con el comportamiento observado en sistemas industriales reales, en los que la carga acumulada afecta al rendimiento. La introducción de modelos dinámicos permite aproximar mejor la realidad operativa.

La integración de las dinámicas térmicas mejora significativamente la planificación de la producción. Este enfoque permite obtener soluciones más realistas, eficientes y robustas. El trabajo abre nuevas líneas de investigación en la combinación de optimización y sistemas físicos.

## REFERENCIAS

[1] Framinan, Jose M.; Gupta, Jatinder N. D.; Leisten, Rainer (2004). “A review and classification of heuristics for permutation flow-shop scheduling with makespan objective”. *Journal of the Operational Research Society*, v. 55, n. 12, p.p. 1243-1255. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601784

[2] Nawaz, Muhammad; Enscore Jr, E. Emory; Ham, Inyong (1983). “A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem”. *Omega*, v. 11, n. 1, p.p. 91-95. https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90088-9

[3] Juan, Ángel A.; Barrios, Barry B.; Vallada, Eva; Riera, Daniel; Jorba, Josep (2014). “A simheuristic algorithm for solving the permutation flow shop problem with stochastic processing times”. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 46, p.p. 101-117. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.02.005

[4] Taillard, Éric D. (1993). “Benchmarks for basic scheduling problems”. *European Journal of Operational Research*, v. 64, n. 2, p.p. 278-285. https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M

# Impacto de IA Generativa en Educación Secundaria: meta-revisión sistemática y aproximación cualitativa

**Alfonso-Molina, María; [(1)], Jiménez-Puerto, Joaquín [(2)], Pérez-Aguilar, Blanca [(2)]**
*(1) Departamento de Teoría de la educación, Universitat de València ( malmo8@uv.es )*
*(2) Departament d'Estadística i Investigació Operativa Aplicades i Qualitat, Universitat Politècnica de València ( joajipue@upv.es )*
*(3) Departamento de Internacionalización ( blapeag@upv.es )*

## RESUMEN

Este trabajo presenta una meta-revisión sistemática sobre el impacto de la Inteligencia Artificial Generativa en Educación, complementada con un estudio cualitativo con profesionales de Educación Secundaria. La meta-revisión, ajustada al protocolo PRISMA-P y ejecutada sobre Scopus, sintetiza 173 revisiones secundarias publicadas en revistas entre 2023 y 2025 (115 revisiones sistemáticas, 30 scoping reviews, 9 análisis bibliométricos y 7 revisiones narrativas), y consulta evidencia cuantitativa de 31 metaanálisis del mismo periodo. El corpus evidencia concentración en Educación Superior (60%), con representación marginal de la Educación Secundaria. Los metaanálisis reportan tamaños del efecto en rango moderado-alto sobre rendimiento y motivación, sensibles a la etapa educativa, la disciplina y el modo de integración. La aproximación cualitativa, articulada en torno al marco TPACK, recoge las percepciones de diez profesionales de Secundaria sobre la integración de Inteligencia artificial generativa en sus prácticas docentes. Los resultados convergen en una paradoja de rendimiento: la mejora observable en productos de aprendizaje no se traduce necesariamente en el desarrollo de competencias cognitivas y metacognitivas, y el uso pedagógicamente no estructurado puede deteriorar la construcción autónoma del conocimiento.

**Palabras clave**: IA generativa; meta-revisión sistemática; Educación Secundaria; TPACK; descarga cognitiva; aprendizaje activo

## INTRODUCCIÓN

La irrupción de la Inteligencia Artificial Generativa a finales de 2022 ha supuesto un punto de inflexión en el debate educativo contemporáneo. Junto al reconocimiento de su potencial para la generación de contenido, la personalización del aprendizaje y el procesamiento avanzado del lenguaje natural, la velocidad de adopción de sus sistemas ha intensificado preocupaciones relacionadas con la integridad académica, la sobre dependencia tecnológica y la posible erosión de competencias fundamentales, como la escritura argumentativa, la resolución de problemas y el pensamiento crítico [1]. La presente comunicación articula dos contribuciones complementarias. En primer lugar, una meta-revisión sistemática conforme al protocolo PRISMA-P [2] que sintetiza la evidencia disponible sobre la integración de Inteligencia Artificial Generativa en educación, caracteriza las etapas educativas, áreas disciplinares y modalidades de aplicación documentadas, y delimita los vacíos persistentes en la base de evidencia. En segundo lugar, una aproximación cualitativa basada en grupo focal con diez profesionales de Educación Secundaria, orientada a contrastar los hallazgos bibliográficos con la práctica docente situada e identificar las tensiones específicas que la integración de Inteligencia Artificial Generativa plantea. El estudio se inscribe en el Paquete de Trabajo 3 (WP3, Future Learning) de la Alianza Europea de Universidades

Tecnológicas ENHANCE+, cuyo mandato pedagógico incluye la generación de evidencia transferible sobre formatos docentes innovadores en universidades técnicas europeas.

## INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA: ESTADO Y LIMITACIONES

La producción de revisiones sobre inteligencia artificial generativa en educación ha crecido con rapidez, abarcando un espectro temático amplio y heterogéneo que incluye, entre los ámbitos más representados, el impacto en STEM y Educación Superior [3], [4], la enseñanza de lenguas extranjeras [5], [6], la educación médica, la integridad académica, la evaluación automatizada, el aprendizaje personalizado y la formación docente, con presencia todavía marginal de la Educación Secundaria como contexto específico [7]. Con independencia del ámbito, estos trabajos descansan mayoritariamente en discusiones teóricas y diseños transversales que no permiten establecer relaciones causales entre la adopción de Inteligencia Artificial Generativa y el impacto sobre el aprendizaje. Las conclusiones derivadas son, con frecuencia, contradictorias: mientras algunas revisiones advierten que la dependencia no mediada del sistema puede inhibir el desarrollo del pensamiento crítico [8], otras sostienen que su uso puede fomentarlo al actuar como plataforma de exploración de ideas [9], [10]. Esta divergencia no refleja mera heterogeneidad temática, sino inconsistencia metodológica en los estudios primarios subyacentes, lo que justifica la necesidad de una meta-revisión capaz de evaluar sistemáticamente la calidad metodológica, la consistencia conceptual y el alcance empírico de la evidencia acumulada.

### Descarga cognitiva y paradoja del rendimiento

Una línea de investigación particularmente relevante para evaluar los efectos cognitivos del uso sostenido de Inteligencia Artificial Generativa es la teoría de la descarga cognitiva (cognitive offloading) [11] entendida como el uso de recursos externos para reducir las demandas cognitivas internas. Los chatbots pueden interpretarse como dispositivos de descarga en la medida en que liberan al usuario del procesamiento elaborado de información, pero esta liberación no es neutra: cierta evidencia emergente sugiere que el uso intensivo correlaciona con un deterioro de las habilidades de pensamiento crítico [1] y con efectos negativos sobre los procesos de aprendizaje cuando no se integra en marcos pedagógicos específicos [12]. La distinción entre rendimiento aparente y aprendizaje efectivo adquiere así un carácter epistemológica y pedagógicamente crítico: el metaanálisis de Deng et al. (2025) reporta mejoras en métricas de producto (calificaciones, exactitud gramatical) entre estudiantes que utilizan Inteligencia Artificial Generativa, pero estas métricas no equivalen a un incremento en las capacidades intrínsecas del aprendiz.

### TPACK y formación docente en IA generativa

La integración pedagógicamente sólida de IA Generativa en entornos educativos requiere un marco que articule la triple intersección entre conocimiento tecnológico, pedagógico y disciplinar. El modelo TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) ha sido adaptado recientemente para incorporar las particularidades de la Inteligencia Artificial Generativa mediante extensiones como el I-TPACK [13] o el TPCEK (Technological Pedagogical Content Ethical Knowledge; [9]), que añaden una dimensión deontológica explícita en el manejo de sistemas de Inteligencia Artificial Generativa en el aula. Esta evolución refleja una constatación pedagógica: la competencia técnica con la herramienta es condición necesaria pero no suficiente para

garantizar un uso educativo efectivo y ético, lo que sitúa la formación del profesorado como punto crítico de cualquier estrategia de integración.

## DISEÑO METODOLÓGICO

### Meta-revisión sistemática

El protocolo se ajusta a las directrices PRISMA-P [2]. Las dos preguntas de investigación que estructuran el estudio son: (RQ1) ¿Cuáles son las etapas educativas, áreas temáticas, contextos de intervención y modos de implementación de las intervenciones con Inteligencia Artificial Generativa documentados en la literatura?, y (RQ2) ¿Cómo percibe la comunidad educativa la eficacia de Inteligencia Artificial Generativa en sus experiencias educativas, particularmente en el contexto de la Educación Secundaria? La búsqueda bibliográfica se ejecutó en Scopus combinando descriptores relativos a la herramienta (chatgpt, gpt-3.5, gpt-4, generative ai, genai), estudios secundarios (systematic review, scoping review, meta-analysis) y al constructo educativo de interés (academic achievement, learning outcome, competence). Se aplicaron filtros de año de publicación (2020-2025) e idioma (inglés). La heterogeneidad en las aplicaciones de Inteligencia Artificial Generativa determinó una síntesis estructurada en torno a las dimensiones bibliográficas, características de revisión, contexto educativo, características de la intervención y análisis estadístico de los estudios primarios incluidos. Una búsqueda actualizada ejecutada en mayo de 2026 con cadena ampliada —incorporando los descriptores gpt-4o, large language model, llm y gemini junto a los tipos de revisión umbrella review y literature review— recuperó 502 registros en Scopus (2023–2025), de los que 180 son estudios secundarios publicados en revista (Article o Review), lo que confirma la aceleración exponencial del campo y la representatividad del corpus analizado.

### Estudio cualitativo: grupo focal

Para triangular los hallazgos de la meta-revisión con la práctica docente situada, se diseñó un grupo focal con diez profesionales de Educación Secundaria seleccionados mediante criterios sistemáticos (familiaridad con tecnologías de Inteligencia Artificial Generativa y disposición a participar en conversaciones en profundidad sobre su integración pedagógica). La muestra combina docentes de áreas distintas (Lengua Inglesa, Informática, Física y Química, Lengua Francesa, Filosofía), orientadores educativos y personal directivo, con experiencia profesional comprendida entre 2 y 27 años. El instrumento se articuló en torno a cuatro dimensiones derivadas del marco TPACK (conocimiento pedagógico, conocimiento tecnológico, retos y oportunidades, necesidades formativas) operacionalizadas en preguntas abiertas (Tabla 1). El análisis se realizó mediante codificación temática con triangulación entre investigadores, identificando categorías emergentes en relación con las intenciones pedagógicas, los obstáculos percibidos y los riesgos cognitivos asociados al uso del sistema.

**Tabla 1.** Dimensiones del grupo focal articuladas según el marco TPACK.

| Dimensión | Pregunta de exploración |
|---|---|
| Conocimiento pedagógico | ¿En qué medida comprende la contribución pedagógica de las herramientas basadas en IA a su área? ¿Qué conocimiento posee sobre su uso para monitorizar el aprendizaje? |
| Conocimiento tecnológico | ¿Qué familiaridad tiene con la formulación de instrucciones (prompts) para sistemas de IA? ¿Considera disponer del conocimiento suficiente para usarlas eficazmente? |

| | |
|---|---|
| Retos y oportunidades | ¿Cuáles son los principales obstáculos para implementar tecnologías como ChatGPT en el aula? ¿Qué oportunidades o amenazas identifica para los procesos educativos? |
| Necesidades formativas | ¿Qué tipo de formación considera necesaria para una implementación efectiva? ¿Cómo ha sido su experiencia personal con ChatGPT u otras tecnologías de IA? |

## RESULTADOS

### Patrones bibliométricos y modalidades de aplicación

La búsqueda bibliográfica ejecutada en Scopus recuperó 502 registros (2022–2025), de los cuales el 74,3% son artículos de revista (n = 373), el 22,5% comunicaciones a congreso (n = 113) y el 3,2% libros o capítulos (n = 16). El patrón de crecimiento es exponencial: de 38 registros en 2023 se pasa a 155 en 2024 y 308 en 2025, lo que refleja la consolidación acelerada de la IAG como objeto de investigación educativa. El 49,4% del corpus (248/502) corresponde a estudios secundarios, de los cuales 204 son artículos de revista —115 revisiones sistemáticas, 34 metaanálisis, 30 scoping reviews, 12 análisis bibliométricos, 7 revisiones narrativas y 1 umbrella review— y constituyen el objeto de síntesis de esta meta-revisión. Las fuentes con mayor producción son Frontiers in Education, Computers and Education: Artificial Intelligence y Education Sciences.

En cuanto a la etapa educativa, el 71% del corpus total se refiere a Educación Superior, el 13% a K-12 o Secundaria y el 12% al ámbito médico-sanitario. Por ámbitos temáticos, STEM y computación concentran el 78% de los registros, seguidos de la enseñanza de lenguas (42%), la evaluación automatizada (30%) y la integridad académica (20%). El artículo más citado del corpus es de 2023 (1.451 citas), y los diez trabajos más citados son todos de 2023–2024, lo que indica que la literatura seminal está ya consolidada y la producción de 2025 es fundamentalmente acumulativa. Los 34 metaanálisis identificados reportan tamaños del efecto en rango moderado-alto sobre rendimiento y motivación —[14] g = 0,683; [15]: g = 0,804; (Deng et al., 2025): g = 0,857 en rendimiento y g = 0,803 en motivación—, con heterogeneidad moderada por etapa, disciplina y modo de integración. La ausencia casi total de evidencia focalizada en Educación Secundaria como contexto principal constituye el hallazgo negativo más relevante del corpus: la extrapolación directa de conclusiones universitarias a esta etapa resulta metodológicamente indefendible.

### Hallazgos del grupo focal

El análisis cualitativo identifica tres ámbitos principales de uso de Inteligencia Artificial Generativa: planificación (adaptación curricular, diseño de actividades, generación de pruebas de nivel), implementación (selección de actividades en función de retroalimentación de IA, accesibilidad, intervención oportuna en atención a la diversidad —estudiantes con discapacidad visual, dislexia o alumnado de origen extranjero—) y evaluación (asistencia en la toma de decisiones, generación de rúbricas, retroalimentación formativa). Las limitaciones identificadas son simultáneamente técnicas, institucionales y pedagógicas: capacidad limitada del sistema para tareas que requieren comprensión matizada, infraestructura técnica insuficiente, escasa adaptabilidad a contextos heterogéneos, ineficiencia para evaluaciones que capturen la profundidad del aprendizaje, déficit de alfabetización tecnológica del profesorado y retroalimentación adaptativa insuficiente. Emerge, además, como categoría transversal, una paradoja de rendimiento: las tareas ejecutadas con asistencia de Inteligencia

Artificial Generativa exhiben un producto aparentemente mejorado que no se corresponde necesariamente con desarrollo de competencias subyacentes, lo que problematiza los objetivos mismos de la evaluación. Como sintetizó un participante, la pregunta crítica deja de ser cómo detectar contenido generado por Inteligencia Artificial Generativa y pasa a ser qué estamos evaluando realmente.

## DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Los resultados convergen en una conclusión central: la integración educativa de Inteligencia Artificial Generativa no es pedagógicamente neutra y su impacto sobre el aprendizaje depende críticamente del marco didáctico en el que se inserta. Tanto la evidencia sintetizada en la meta-revisión como los hallazgos del grupo focal apuntan a que la mejora observable en determinados productos académicos puede coexistir con una reducción de los procesos cognitivos implicados en la construcción autónoma del conocimiento, especialmente en ámbitos vinculados al pensamiento crítico, la autorregulación y el aprendizaje colaborativo.

La Educación Secundaria emerge como un ámbito de particular vulnerabilidad y oportunidad pedagógica: la adquisición de competencias cognitivas y metacognitivas fundamentales se desarrolla en esta etapa, lo que vuelve especialmente crítica la integración pedagógicamente sólida de tecnologías que pueden, según su diseño y uso, ya facilitar ya inhibir esos procesos. Los resultados sustentan la necesidad de programas estructurados de formación docente anclados en marcos pedagógicos específicos —I-TPACK, TPCEK— que articulen competencia técnica, pedagógica y ética, e identifican una agenda de investigación prioritaria sobre el impacto longitudinal del uso de Inteligencia Artificial Generativa en procesos de aprendizaje.

## CONCLUSIONES

La meta-revisión sistemática y el estudio cualitativo conjuntamente realizados permiten establecer tres conclusiones articuladas. Primero, la base empírica disponible sobre el impacto educativo de Inteligencia Artificial Generativa, aunque creciente, presenta limitaciones metodológicas sustanciales y concentra su producción en contextos universitarios, dejando insuficientemente caracterizadas las etapas educativas previas. Segundo, el uso pedagógicamente no estructurado de la herramienta puede generar una paradoja de rendimiento en la que la mejora del producto coexiste con el deterioro de procesos cognitivos centrales, fenómeno coherente con la teoría de la descarga cognitiva [16] y con la evidencia experimental emergente. Tercero, la integración educativa efectiva de la Inteligencia Artificial Generativa requiere marcos pedagógicos específicos, formación docente sistemática y políticas institucionales explícitas, particularmente en etapas formativas anteriores a la Educación Superior.

El trabajo contribuye así a los objetivos del WP3 de la Alianza ENHANCE+ mediante la aportación de evidencia empírica y conceptual orientada a determinar una línea de investigación enfocada a estudios metodológicos en educación, transferible al conjunto de universidades tecnológicas europeas integradas en el consorcio.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto ENHANCE+ (European Universities of Technology Alliance), financiado por la Unión Europea a través del programa Erasmus+. Asimismo, se enmarca en las líneas estratégicas impulsadas por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades para la transformación digital, la innovación educativa y el fortalecimiento del Espacio Europeo de Educación Superior. Las opiniones expresadas son exclusivamente responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las de la Unión Europea, la EACEA ni las instituciones financiadoras.

## REFERENCIAS

[1] M. Gerlich, 'AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking', *Societies*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/soc15010006.

[2] D. Moher *et al.*, 'Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement', *Revista Espanola de Nutricion Humana y Dietetica*, vol. 20, no. 2, pp. 148–160, 2016, doi: 10.1186/2046-4053-4-1.

[3] L. Chen, P. Chen, and Z. Lin, 'Artificial Intelligence in Education: A Review', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75264–75278, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988510.

[4] S. Grassini, 'Shaping the Future of Education: Exploring the Potential and Consequences of AI and ChatGPT in Educational Settings', Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/educsci13070692.

[5] M. Imran and N. Almusharraf, 'Analyzing the role of ChatGPT as a writing assistant at higher education level: A systematic review of the literature', Oct. 01, 2023, *Bastas*. doi: 10.30935/cedtech/13605.

[6] A. M. Mohamed, 'Exploring the potential of an AI-based Chatbot (ChatGPT) in enhancing English as a Foreign Language (EFL) teaching: perceptions of EFL Faculty Members', *Educ. Inf. Technol. (Dordr).*, vol. 29, no. 3, pp. 3195–3217, Feb. 2024, doi: 10.1007/s10639-023-11917-z.

[7] A. N. Ansari, S. Ahmad, and S. M. Bhutta, 'Mapping the global evidence around the use of ChatGPT in higher education: A systematic scoping review', *Educ. Inf. Technol. (Dordr).*, vol. 29, no. 9, pp. 11281–11321, Jun. 2024, doi: 10.1007/s10639-023-12223-4.

[8] A. D. Samala *et al.*, 'Unveiling the landscape of generative artificial intelligence in education: a comprehensive taxonomy of applications, challenges, and future prospects', *Educ. Inf. Technol. (Dordr).*, vol. 30, no. 3, pp. 3239–3278, Feb. 2025, doi: 10.1007/s10639-024-12936-0.

[9] G. Deng and J. Zhang, 'Technological pedagogical content ethical knowledge (TPCEK): The development of an assessment instrument for pre-service teachers', *Comput. Educ.*, vol. 197, May 2023, doi: 10.1016/j.compedu.2023.104740.

[10] R. Deng, M. Jiang, X. Yu, Y. Lu, and S. Liu, 'Does ChatGPT enhance student learning? A systematic review and meta-analysis of experimental studies', *Comput. Educ.*, vol. 227, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.compedu.2024.105224.

[11] E. F. Risko and S. J. Gilbert, 'Cognitive Offloading', 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.tics.2016.07.002.

[12] R. Mayer, *Multimedia Learning*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2020. doi: 10.1017/9781316941355.

[13] I. Celik, 'Towards Intelligent-TPACK: An empirical study on teachers' professional knowledge to ethically integrate artificial intelligence (AI)-based tools into education', *Comput. Human Behav.*, vol. 138, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.chb.2022.107468.

[14] J. Gu and Z. Yan, 'Effects of GenAI Interventions on Student Academic Performance: A Meta-Analysis', Oct. 01, 2025, *SAGE Publications Inc.* doi: 10.1177/07356331251349620.

# Investigación de atributos críticos de la materia prima: influencia del color y procesos previos de tintura

**Otero-Camaño, Sabela[(1)], Fabra-Regalado, Marta[(1)], Jordán-Núñez, Jorge[(2)], Micó-Vicent, Bàrbara[(2)], López-Rodriguez, Daniel[(3)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, mfabreg@doctor.upv.es, sotecam@doctor.upv.es*

*(2) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

## RESUMEN

Los esfuerzos por alcanzar una producción textil verdaderamente sostenible han impulsado el interés en innovadoras tecnologías de reciclaje que logren reducir el impacto ambiental y el elevado consumo de recursos. En este contexto, el reciclaje mecánico de fibras de algodón representa una excelente alternativa, muy práctica y eficiente para recuperar material, superando en viabilidad a los métodos químicos. Sin embargo, la calidad final de las fibras recuperadas dependerá siempre de las características originales del residuo. Este estudio analiza los atributos más críticos del residuo textil, focalizándose específicamente en el efecto del color aportado por procesos químicos previos, ya que estos influyen directamente en el rendimiento de las fibras de algodón recicladas. Para lograrlo, los residuos fueron caracterizados utilizando metodologías consolidadas en la ingeniería textil. La calidad de estas fibras se evaluó mediante indicadores clave: distribución de longitud, tenacidad, elongación, presencia de neps y el grado de apertura. Los resultados demuestran fuertes correlaciones entre la materia prima inicial y las propiedades mecánicas de las fibras recicladas, subrayando la enorme importancia de clasificar cuidadosamente los residuos. Identificar estos factores proporciona directrices esenciales para optimizar procesos, producir fibras de alta calidad, facilitar nuevas aplicaciones y fomentar prácticas circulares industriales.

**Palabras clave:** Fibra reciclada; algodón; reciclado mecánico; color; calidad de fibra; sostenibilidad.

## INTRODUCCIÓN

La industria textil enfrenta una presión creciente para reducir su impacto ambiental y avanzar hacia modelos circulares. El reciclaje de fibras de algodón se presenta como una estrategia clave, especialmente mediante procesos mecánicos que permiten recuperar fibras sin recurrir a tratamientos químicos intensivos. Sin embargo, la calidad del producto reciclado depende principalmente de las características del material de desecho [1]. En el mercado textil existe una amplia gama de colores que responden a las tendencias de moda, aunque los tonos básicos; como blanco, natural y crudo, se mantienen como los más recurrentes siendo producidos en cada temporada. Estos colores predominantes generan los volúmenes más significativos de residuos posconsumo y postindustrial, lo que les otorga una especial relevancia dentro del análisis de flujos de desecho. La presencia de estos residuos cromáticos repercute directamente en la calidad de la fibra reciclada obtenida, no solo por sus características

estéticas de color, sino por la relación de dicho color con los procesos de blanqueo y tintura realizados previamente y que afectan a la estructura fisicoquímica de la celulosa. El blanqueo con peróxido de hidrógeno, por ejemplo, produce radicales hidroxilos que atacan las cadenas de glucosa de la celulosa, reduciendo su grado de polimerización y fragilizando la fibra [2,3]. Por ello, el estudio de los colores básicos; blanco, natural y crudo, y su relación con los parámetros de la calidad de la fibra reciclada se convierte en un eje fundamental para optimizar la circularidad del algodón y garantizar la viabilidad técnica de su reutilización en la industria textil.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es determinar la relación entre los colores presentes en los residuos de algodón utilizados en el proceso de reciclaje mecánico de fibra de algodón justificando estos en los procesos previos empleados para su obtención (tintura en fibra, tintura en hilo, tintura en pieza y estampación), con los parámetros de calidad de la fibra de algodón reciclada obtenida mediante procesos mecánicos.

- Analizar como los distintos métodos de coloración aplicados al algodón (ej. blanqueo con/sin OBA y descrudado) afectan a la calidad, especialmente en términos de longitud, resistencia de cara a evaluar la capacidad de reutilización en nuevos procesos de hilatura.
- Determinar las correlaciones entre el tipo de color aplicado (blanco, natural, y crudo) y las propiedades mecánicas y funcionales de la fibra reciclada obtenida, considerando parámetros como distribución de longitudes, tenacidad, y contenido de neps.

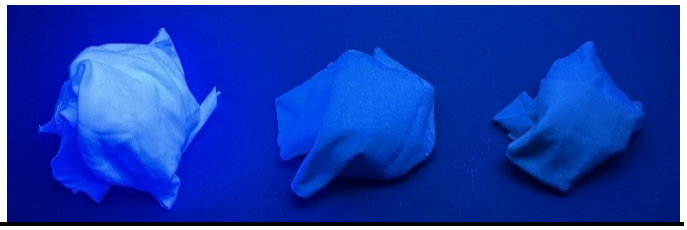
## MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras analizadas corresponden a fibras de algodón recicladas mecánicamente, procedentes de materiales de origen preconsumo que ha sido clasificados según su color de cara a tener en cuenta el proceso químico previo por el cual han obtenido los colores correspondientes; blanco, natural y crudo. La segregación del material preconsumo se realiza partiendo de unas muestras patrón para la correcta identificación visual y clasificación para la realización de las pruebas definidas. Las muestras de referencia de color de cada color definido se muestran en la Tabla 1. Se realizaron cinco pruebas por cada color a escala industrial utilizando materia textil de origen pre-consumo (tejido de punto), procesadas en lotes de aproximadamente 10.000 kg para garantizar datos estadísticamente relevantes y condiciones reales de producción. Cada lote fue identificado por su color y código de producción, evaluándose parámetros físicos y colorimétricos.

Las propiedades medidas incluyeron: contenido de fibras cortas (SFC), longitud media (UQML), índice de uniformidad (UI) tenacidad, elongación, número de neps y gramo de apertura. Paralelamente, se registraron valores de colorimetría en el espacio CIELab (L, a, b*) y el índice de blancura (WI). El análisis estadístico se efectuó mediante ANOVA de un factor, considerando el color como variable independiente y cada propiedad como dependiente, con el fin de identificar diferencias significativas entre grupos. Esta metodología permitió correlacionar los procesos previos de tintura y blanqueo con las propiedades físicas de la fibra reciclada.

En definitiva, el enfoque aplicado asegura que los resultados reflejen fielmente la realidad industrial y aporten directrices prácticas para optimizar la clasificación de residuos por color, anticipando su comportamiento en reciclaje mecánico y su reincorporación en nuevas aplicaciones de hilatura.

**Tabla 1.** Muestras de referencia para la segregación de colores.

| Iluminante | Blanco | Natural | Crudo |
|---|---|---|---|
| D65 |  | | |
| UV |  | | |

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Colorimetría

Los métodos más comunes de coloración del algodón son el blanqueo y la tintura. Los colores claros, como el blanco, se obtienen mediante procesos de blanqueo con agentes ópticos, mientras que los tonos natural y crudo resultan de la eliminación parcial de pigmentos sin tratamientos intensivos. Esta clasificación cromática refleja fielmente los residuos disponibles en la industria textil y facilita la trazabilidad de los procesos previos de coloración, relacionándolos con atributos críticos para la evaluación de la fibra reciclada. La segregación por color es esencial, ya que cada tratamiento deja una huella química distinta en la celulosa como se indica en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Pruebas con natural, blanco y crudo.

| Color | Tejido | Proceso de blanqueo | Proceso de tintura |
|---|---|---|---|
| Natural | Punto | Blanqueo convencional | N/A |
| Blanco | Punto | Blanqueo con peróxido de hidrógeno | Aplicación de agentes blanqueadores ópticos (OBA) |
| Crudo | Punto | Descrudado y lavado, sin blanqueo completo | N/A |

Los valores colorimétricos obtenidos tras el reciclaje mecánico de las fibras de algodón se presentan en la Tabla 3, donde se muestran las diferencias asociadas a la clasificación del material y a los procesos de tintura o blanqueo empleados para su

obtención. Esta información permite relacionar la variación en parámetros como L, a, b*, el índice de blancura (WI) con el historial de tratamiento previo de cada grupo de fibras:

**Tabla 3.** Resultados colorimétricos de cada color; natural, blanco y crudo.

| Color | L* | a* | b* | WI |
|---|---|---|---|---|
| Blanco | 93,080 | 3,148 | -12,405 | 139,687 |
| Natural | 93,750 | -0,359 | 3,570 | 68,296 |
| Crudo | 86,861 | 1,199 | 10,692 | 17,557 |

El análisis colorimétrico de la fibra resultante permitió establecer diferencias claras entre las producciones de algodón reciclado según el origen cromático y el tratamiento previo recibido por los materiales preconsumo procesados. Los tejidos clasificados como blanco obtuvieron fibra que presenta valores elevados de L* superiores a 93 y un índice de blancura (WI) superior a 139, resultado de procesos de blanqueo intensivo con agentes blanqueantes ópticos (OBA).

En contraste, las producciones de fibra Natural sin OBA mostraron valores de L* similares a los de Blanco pero con WI inferiores, sobre 93, reflejando un blanqueo químico sin incorporación de blanqueante óptico, resultando en un color claro menos brillante. Las fibras crudas conservaron su tonalidad natural, con valores de L* alrededor de 86 y coordenadas cromáticas a* y b* positivas, que indican un tono amarillento característico de la celulosa sin blanqueo.

**Propiedades físicas**

La evaluación de los residuos segregados por color permitió analizar de forma comparativa cómo los estos, como indicador de los procesos químicos previos asociados, repercuten en indicadores clave para la evaluación de la calidad como; la distribución de longitudes de fibra definidos por UQML, SFC y UI, la tenacidad y elongación, así como la presencia de neps y el grado de apertura. Estos parámetros son determinantes de la capacidad de hilado ofrecen una visión integral del estado físico de la fibra reciclada y permiten establecer correlaciones directas entre el tipo de color aplicado y el rendimiento mecánico de la fibra obtenida. Los resultados medios obtenidos en las producciones realizadas se muestran en la Tabla 4:

**Tabla 4.** Resultados obtenidos en las pruebas de cada color; natural, blanco y crudo.

| Color | Mean (mm) | UQML (w)(mm) | SFC (w)(%) | UI | Tenacidad (g/tex) | Elongación (%) | Neps (nr) | Grado apertura (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blanco | 14,56 | 19,87 | 40,5% | 74,57 | 12,34 | 7,7% | 425,3 | 23,7% |
| Natural | 17,65 | 23,94 | 25,1% | 77,23 | 25,91 | 9,4% | 591,4 | 21,5% |
| Crudo | 18,67 | 25,18 | 21,5% | 78,56 | 18,81 | 11,4% | 621,1 | 17,2% |

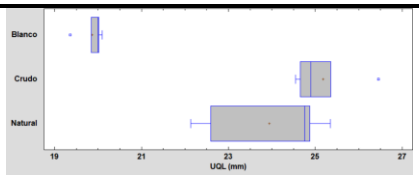
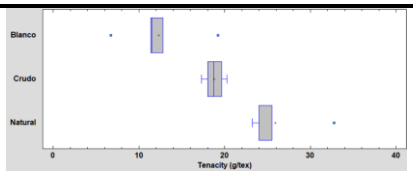
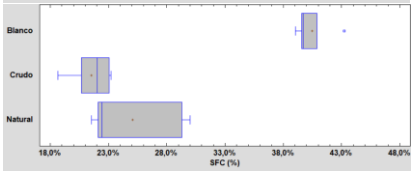
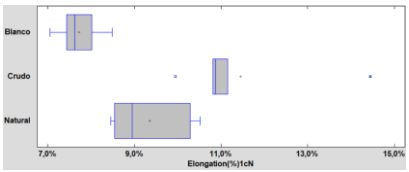
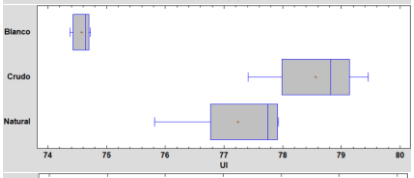
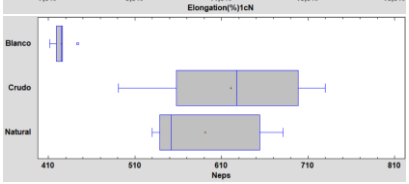
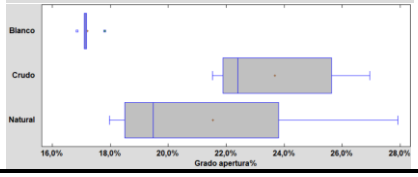
Este análisis profundiza en la relevancia del color de la materia prima antes del proceso de reciclaje mecánico, en relación con los procesos colorimétricos realizados previamente que le han otorgado su tonalidad característica. Dichos procesos previos; blanqueo convencional, blanqueo con peróxido e incorporación de agentes blanqueantes ópticos, así como el descrudado, repercuten y provocan una modificación

de la estructura fisicoquímica de la celulosa de tal forma que influye directamente en la calidad de la fibra reciclada final. Esta constatación resulta de crucial importancia a nivel industrial, ya que permite optimizar el reciclaje mecánico para la obtención de fibras de algodón de mayor calidad y con mejor desempeño en procesos posteriores de hilatura.

**Comparativa ANOVA**

Con el fin de evaluar si las diferencias observadas en las propiedades físicas de las fibras recicladas son estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) considerando el color como factor independiente y cada propiedad como variable dependiente. Este enfoque permite determinar si los valores medios de longitud (Mean y UQML), contenido de fibras cortas (SFC), índice de uniformidad (UI), tenacidad, elongación, número de neps y el grado de apertura difieren de manera relevante entre los grupos definidos para este estudio; blanco, natural y crudo (Tabla 5).

**Tabla 5.** Resultados obtenidos de las comparativas ANOVA.

| Variable | Gráfico | Variable | Gráfico |
|---|---|---|---|
| UQML (mm) |  | Tenacidad (g/tex) |  |
| SFC (%) |  | Elongación (%) |  |
| UI |  | Neps (nr) |  |
| Grado apertura |  | | |

En este caso, los resultados obtenidos muestran diferencias significativas en varias propiedades clave, lo que confirma que el proceso de coloración previo influye directamente en la calidad de las fibras recicladas. El análisis de varianza confirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de color en varias de las propiedades físicas evaluadas. En el caso de las distribuciones de longitud de fibra, definidos por UQML, SFC y UI. Los valores muestran que el algodón crudo y natural mantienen longitudes superiores y menor proporción de fibras cortas respecto al blanco, lo que se traduce en una mejor calidad para procesos de hilatura. El índice de uniformidad, UI también indica al grupo crudo con superior uniformidad, mientras que el blanco se asocia a una menor uniformidad consecuencia del blanqueo intensivo.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la tenacidad destaca en el grupo natural, con valores significativamente superiores a los demás, lo que indica una mayor resistencia

de la fibra reciclada. La elongación muestra un comportamiento diferenciado: el crudo alcanza los valores más altos, lo que sugiere mayor flexibilidad, mientras que el blanco presenta la menor capacidad de deformación. Finalmente, el número de neps evidencia que tanto el crudo como el natural generan más irregularidades que el blanco, lo que puede relacionarse con la facilidad de rotura de la fibra debido a valores de tenacidad inferiores.

Los resultados ANOVA permiten concluir que el color y el proceso de tintura/blanqueo previo son factores determinantes en la calidad de la fibra reciclada: el natural y el crudo ofrecen mejor desempeño mecánico y estructural, mientras que el blanco refleja una degradación significativa asociada al tratamiento químico.

## CONCLUSIONES

En conclusión, los resultados de esta investigación ponen de manifiesto que la calidad de la fibra reciclada de algodón depende de manera directa de los procesos de coloración a los que ha sido sometida la materia prima, siendo especialmente críticos los tratamientos de blanqueo intensivo. El blanqueo con peróxido y OBA, aplicado para obtener blancos brillantes, provoca oxidación parcial de la celulosa que reduce la elongación y fragiliza la fibra reduciendo así su resistencia lo que genera un mayor porcentaje de fibras cortas y disminuyendo su capacidad de hilado. En contraste, los residuos de colores naturales y crudos, sometidos a procesos menos agresivos, conservan mejor la tenacidad y en consecuencia la longitud, mostrando un comportamiento más favorable de cara a la reincorporación en procesos de hilatura.

Estas evidencias subrayan la necesidad de una clasificación cromática cuidadosa de los residuos textiles, ya que el color no solo refleja una preferencia estética del mercado, sino que constituye un indicador técnico de la calidad potencial de la fibra reciclada. La correlación entre tipo de color, procesos de blanqueo o tintura y parámetros críticos como longitud, tenacidad y elongación se convierte en un eje fundamental para optimizar la circularidad del algodón y garantizar su viabilidad técnica en nuevos procesos de hilatura, aportando directrices prácticas y claras para la industria, orientadas a avanzar hacia una producción textil más sostenible y eficiente.

## REFERENCIAS

[1] Judijanto, Loso; Yamtana; Pahrijal, Rival (2024). "Bibliometric Analysis of the Effectiveness of Waste Management and Recycling Programs in the Textile Industry". West Science Interdisciplinary Studies, v. 02, n. 09, p.p. 1787-1798.

[2] Wagaw, T.; Getnet, M.; Flatie, D. (2024). "Chemical Processing of Cotton Textiles". p.p. 305–330. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9149-5_12

[3] Bolat, F.; Ghitman, J.; Necolau, M. I.; Vasile, E.; Iovu, H. (2023). "A Comparative Study of the Impact of the Bleaching Method on the Production and Characterization of Cotton-Origin Nanocrystalline Cellulose by Acid and Enzymatic Hydrolysis". Polymers, v. 15, n. 16. https://doi.org/10.3390/polym15163446

# La teoría de grafos en contexto: uso de redes reales en el aula

**Inza, Alejandro[(1)], López, Daniel [(2)], Martí, Marc[(3)], Cremades, Andrés[(4)]**

*(1) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, alinfi@mat.upv.es*
*(2) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, dalorod@upv.es*
*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, marmars6@mat.upv.es*
*(4) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, ancrebo@upv.es*

## RESUMEN

Esta innovación docente propone un enfoque didáctico basado en la contextualización de los contenidos mediante ejemplos procedentes del entorno real. Frente a la enseñanza tradicional, centrada en la abstracción de vértices y aristas, esta propuesta introduce redes como las sociales, de transporte o de comunicación para facilitar la comprensión de los conceptos fundamentales.

La metodología se apoya en el análisis de casos reales, donde el alumnado identifica elementos clave de los grafos y resuelve problemas aplicados, como la detección de nodos relevantes o el cálculo de rutas óptimas. Este enfoque se complementa con herramientas digitales que favorecen la visualización y manipulación de estructuras, promoviendo una participación más activa.

Los resultados evidencian una mejora en la comprensión conceptual, un aumento de la motivación y una mayor capacidad para transferir conocimientos a situaciones prácticas. Asimismo, se fomenta el pensamiento crítico y el aprendizaje interdisciplinar.

En conjunto, esta propuesta contribuye a un aprendizaje más significativo y aplicado, alineado con las demandas actuales de la educación superior y orientado a la resolución de problemas reales.

**Palabras clave:** teoría de grafos, redes reales, innovación docente, aprendizaje significativo, contextualización educativa.

## INTRODUCCIÓN

La teoría de grafos se ha consolidado como una de las áreas fundamentales dentro de las matemáticas discretas, con un impacto significativo en disciplinas como la informática, la ingeniería, la economía o las ciencias sociales. Su capacidad para modelizar relaciones entre elementos la convierte en una herramienta clave en el análisis de redes complejas, tales como sistemas de transporte, redes de comunicación o plataformas sociales [4]. No obstante, a pesar de su relevancia y aplicabilidad, su enseñanza en el ámbito universitario continúa caracterizándose, en muchos casos, por un enfoque predominantemente teórico y abstracto.

Tradicionalmente, los grafos se introducen como estructuras formales definidas por conjuntos de vértices y aristas, acompañadas de propiedades y resultados matemáticos

que, si bien son esenciales, pueden resultar poco accesibles para el alumnado en las etapas iniciales de aprendizaje. Esta desconexión entre la teoría y su aplicación práctica puede dificultar la comprensión de los conceptos fundamentales y generar una percepción de la materia como excesivamente abstracta o alejada de la realidad [2].

En este contexto, la innovación educativa orientada a la contextualización del aprendizaje adquiere una especial relevancia. Diversos estudios en la didáctica de las matemáticas destacan la importancia de vincular los contenidos teóricos con situaciones reales para favorecer un aprendizaje significativo, entendido como aquel en el que el estudiante es capaz de relacionar los nuevos conocimientos con estructuras cognitivas previas [1]. En esta línea, el uso de redes reales como recurso didáctico permite presentar los conceptos de la teoría de grafos de forma más intuitiva y cercana, facilitando su comprensión y promoviendo una mayor implicación del alumnado.

Asimismo, el avance de las tecnologías digitales ha abierto nuevas posibilidades en la enseñanza de los grafos, permitiendo la visualización y manipulación interactiva de redes complejas. Estas herramientas no solo contribuyen a mejorar la comprensión conceptual, sino que también fomentan metodologías activas centradas en el estudiante, en las que este adopta un papel protagonista en su proceso de aprendizaje [3].

En este marco, la presente propuesta plantea una innovación docente basada en la utilización de redes reales como eje central para la enseñanza de la teoría de grafos en el contexto universitario. El objetivo es superar las limitaciones del enfoque tradicional, promoviendo una enseñanza más aplicada, motivadora y alineada con las demandas actuales de la educación superior.

## OBJETIVOS

La presente innovación docente tiene como objetivo general mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de la teoría de grafos en el ámbito universitario mediante la incorporación de redes reales como recurso didáctico. Este planteamiento pretende superar las dificultades asociadas al carácter abstracto de los contenidos, proporcionando al alumnado una visión más clara, aplicada y significativa de los conceptos fundamentales.

De forma más específica, uno de los objetivos principales es facilitar la comprensión de elementos básicos dela teoría de grafos, como vértices, aristas, grado, conectividad o caminos, a través de su contextualización en situaciones del mundo real. Al trabajar con ejemplos cercanos, los estudiantes pueden interpretar estos coneptos de manera más intuitiva, lo que favorece una mejor asimilación y reduce las barrerasiniciales de aprendizaje.

Asimismo, se busca incrementar la motivación y el interés del alumnado hacia la materia. La incorporación de redes presentes en su entorno cotidiano, como las redes sociales o los sistemas de transporte, contribuye a generar un aprendizaje más atractivo y relevante, lo que repercute positivamente ensu implicación y participación activa en el aula.

Otro objetivo fundamental es fomentar el desarrollo del pensamiento crítico y la capacidad de resolución de problemas. A través del análisis de redes reales, los estudiantes deben enfrentarse a situaciones que requieren interpretar información, identificar estructuras, establecer relaciones y tomar decisiones fundamentadas. Este

proceso favorece no solo la comprensión de los contenidos, sino tambiénel desarrollo de competencias transversales clave en su formación.

Además, se pretende potenciar la capacidad de transferencia del conocimiento, de modo que el alumnado sea capaz de aplicar los conceptos aprendidos en contextos distintos a los trabajados en el aula. Esta habilidad resulta especialmente relevante en la educaicón superior, donde se demanda una formación orientada a la resolución de problemas reales y a la adaptación a diferentes entornos profesionales.

Por último, la propuesta tiene como objetivo promover un enfoque interdisciplinar, mostrando la presencia y utilidad de la teoría de grafos en diversas áreas como la informática, la ingeniería, la economía o las ciencias sociales. De este modo, se contribuye a una formación más integral, enla que el alumnado comprende el valor de los conocimientos adquiridos y su aplicabilidad en distintos ámbitos.

## METODOLOGÍA

La metodología propuesta se fundamenta en un enfoque activo, contextualizado y centrado en el estudiante, en el que las redes reales actúan como eje vertebrador para la enseñanza de la teoría de grafos. Este planteamiento parte de la idea de que el aprendizaje es más eficaz cuando los estudiantes pueden relacionar los conceptos abstractos con situaciones concretas y cercanas a su realidad, favoreciendo así una comprensión más profunda y duradera.

En una primera fase, se introducen los conceptos fundamentales de la teoría de grafos a partir de ejemplos reales que resultan familiares para el alunado. Entre ellos se incluyen redes sociales, sistemas de transporte, redes de comunicación o incluso estructuras como Internet. A través de estos contextos, se presentan de forma intuitiva elementos básicos como vértices, aristas, grado, caminos o conectividad, evitando una introducción exclusivamente formal que pueda dificultar la comprensión inicial.

Una vez adquiridos los conceptos básicos, se desarrolla una segunda fase centrada en la aplicación práctica. En este punto, el alumnado trabaja con diferentes redes reales o simuladas, analizando su estructura y resolviendo problemas concretos. Entre las actividades propuestas se encuentran la identificación de nodos más relevantes dentro de una red, el análisis de la conectividad global, la detección de comunidades o el cálculo de rutas óptimas entre distintos puntos. Este tipo de tareas permite que el estudiante no solo comprenda los conceptos, sino que también aprenda a utilizarlos en contextos reales.

La metodología se complementa con el uso de herramientas digitales de visualización y análisis de grafo, que permiten representar de forma dinámica las estructuras estudiadas. Estas herramientas facilitan la manipulación de redes, la observación de sus propiedades y la experimentación con distintos escenarios, lo que contribuye a reforzar la comprensión conceptual y a hacer más interactivo el proceso de aprendizaje.

Asimismo, se promueve el trabajo colaborativo mediante actividades en grupo, en las que los estudiantes deben discutir, analizar y resolver problemas de manera conjunta. Este enfoque favorece el intercambio de ideas, el desarrollo de habilidades comunicativas y la construcción compartida del conocimiento, aspectos especialmente relevantes en la formación universitaria.

En conjunto, esta metodología busca integrar teoría y práctica de forma equilibrada, situando al estudiante en el centro del proceso de aprendizaje y fomentando una experiencia formativa más activa, significativa y aplicada.

## RESULTADOS

La aplicación de la metodología basada en el uso de redes reales en la enseñanza de la teoría de grafos ha mostrado, de forma general, una mejora en el proceso de aprendizaje del alumnado. En particular, se ha observado una mayor comprensión de los conceptos fundamentales, especialmente aquellos que suelen presentar un mayor nivel de abstracción en enfoques tradicionales, como la conectividad, la centralidad o el análisis de caminos en una red.

Uno de los resultados más destacados ha sido el incremento de la motivación y la participación del estudiantado en las sesiones de trabajo. El uso de ejemplos cercanos a su entorno cotidiano, como redes sociales o sistemas de transporte, ha contribuido a generar un mayor interés por la materia y a favorecer una actitud más activa en el aula. Este aspecto ha repercutido positivamente en la dinámica general del grupo y en su implicación en las actividades propuestas.

Por tanto, se ha constatado una mejora en la capacidad del alumnado para aplicar los conceptos teóricos a situaciones prácticas. La resolución de problemas basados en redes reales ha facilitado la transferencia del conocimiento, permitiendo que los estudiantes identifiquen con mayor facilidad la utilidad de los grafos en contextos diversos. Este hecho sugiere un avance hacia un aprendizaje más significativo y funcional.

Otro aspecto relevante ha sido el desarrollo de habilidades relacionadas con el pensamiento analítico y la toma de decisiones. El trabajo con redes complejas ha exigido a los estudiantes interpretar información, establecer relaciones entre elementos y justificar sus respuestas, lo que ha contribuido a reforzar competencias transversales clave en su formación.

Finalmente, el uso de herramientas digitales de visualización ha sido valorado positivamente, ya que ha permitido una mejor comprensión de las estructuras estudiadas y ha facilitado la exploración de distintos escenarios. En conjunto, los resultados obtenidos apoyan la eficacia del enfoque propuesto y su potencial como estrategia didáctica en la enseñanza de la teoría de grafos en el ámbito universitario.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el potencial de la utilización de redes sociales como estrategia didáctica en la enseñanza de la teoría de grafos, especialmente en lo relativo a la mejora de la comprensión conceptual y al incremento de la motivación del alumnado. No obstante, es necesario interpretar estos resultados con cierta cautela, ya que su alcance puede estar condicionado por diversos factores asociados tanto al diseño de la intervención como al contexto educativo en el que se ha implementado.

En primer lugar, uno de los aspectos a considerar es el papel del profesorado en la selección y adaptación de los ejemplos utilizados. La eficacia de la metodología depende en gran medida de la calidad de las redes escogidas y de su adecuación a los contenidos teóricos que se desean trabajar. Una selección poco ajustada podría derivar en una simplificación excesiva de los conceptos o en una desconexión entre la actividad y los objetivos de aprendizaje.

Por otro lado, aunque el enfoque basado en redes reales favorece una comprensión más intuitiva, existe el riesgo de que el alumnado se centre en la aplicación práctica sin

profundizar suficientemente en la formalización matemática subyacente. Este aspecto resulta especialmente relevante en el ámbito universitario, donde es necesario garantizar el equilibrio entre la intuición y el rigor teórico. En este sentido, la metodología debe complementarse con una adecuada sistematización de los contenidos que asegure la consolidación de los fundamentos teóricos.

También, la incorporación de herramientas digitales, si bien aporta un valor añadido significativo, puede introducir una dependencia tecnológica que no siempre está disponible en todos los contextos educativos. Esto puede generar desigualdades en la implementación de la propuesta o limitar su reproducibilidad en determinados entornos.

A pesar de estas limitaciones, los resultados observados son coherentes con enfoques pedagógicos que destacan la importancia del aprendizaje activo y contextualizado. La literatura previa sugiere que la conexión entre contenidos abstractos y situaciones reales contribuye a un aprendizaje más significativo y duradero, especialmente en disciplinas con un alto componente formal.

En suma, la propuesta se perfila como una estrategia didáctica prometedora, aunque susceptible de mejora mediante una mayor sistematización de las actividades, una selección más estructurada de los casos de estudio y una evaluación más profunda del impacto a largo plazo en el aprendizaje del alumnado.

## CONCLUSIONES

La presente propuesta de innovación docente pone de relieve el valor de la contextualización en la enseñanza de la teoría de grafos mediante el uso de redes reales como recurso didáctico. En conjunto, los resultados obtenidos y la reflexión desarrollada permiten afirmar que este enfoque contribuye de manera positiva a la comprensión de conceptos que, en su formulación tradicional, suele percibirse como altamente abstractos por parte del alumnado universitario.

La integración de ejemplos procedentes de entornos reales facilita la conexión entre la teoría y la práctica, lo que se traduce en un aprendizaje más significativo y en una menor asimilación de los contenidos fundamentales. Asimismo, esta aproximación favorece un aumento de la motivación y de la implicación del estudiantado, aspectos clave en la mejora del rendimiento académico y en la calidad del proceso formativo.

Por otro lado, la metodología propuesta fomenta el desarrollo de competencias transversales como el pensamiento crítico, la capacidad de análisis y la resolución de problemas, todas ellas especialmente relevante en la formación universitaria actual. Del mismo modo, el uso de herramientas digitales y el trabajo con redes reales contribuyen a una experiencia de aprendizaje más dinámica, participativa y cercana a los entornos profesionales.

No obstante, la implementación de este tipo de estrategias requiere una planificación cuidadosa que garantice el equilibrio entre intuición derivada de los ejemplos reales y el rigor matemático propio de la disciplina. En este sentido, la figura del docente adquiere un papel fundamental en la selección de casos, la secuenciación de contendidos y la orientación del aprendizaje.

En conclusión, la enseñanza de la teoría de grafos mediante redes reales se presenta como una alternativa didáctica eficaz y con alto potencial de aplicación en la educación superior, especialmente en aquellas titulaciones donde esta disciplina constituye una base fundamental para el desarrollo de competencias técnicas y analíticas.

## REFERENCIAS

[1] Ausubel, D.P. (2002). *The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

[2] Biggs, J., & Tang, C. (2011). *Teaching for quality learning at university* (4th ed.). Maidenhead: McGraw-Hill / Open University Press.

[3] Jonassen, D. H. (1999). *Designing constructivist learning environments.* In C. M. Reigeluth (Ed.), *Instructional-design theories and models: A new paradigm of instructional theory* (Vol. II, pp. 215-239). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

[4] Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction.* Oxford: Oxford University Press.

# Diseño experimental de un estudio intercomparativo para la medición de estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente

**Fabra-Regalado, Marta[(1)], Otero-Camaño, Sabela[(1)], Jordán-Núñez, Jorge[(2)], López-Rodríguez, Daniel[(3)], Micó-Vicent, Bàrbara[(2)]**

*(1) Escuela de Doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, mfabreg@doctor.upv.es, sotecam@doctor.upv.es*

*(2) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

## RESUMEN

El presente trabajo propone el diseño experimental de un estudio intercomparativo para la medición de estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente, ante la ausencia de protocolos armonizados específicos para este tipo de material. El problema de partida radica en que los sistemas instrumentales empleados habitualmente para algodón virgen fueron desarrollados para morfologías fibrosas diferentes y pueden ofrecer respuestas no equivalentes cuando se aplican a fibras recicladas obtenidas tras procesos de desfibrado mecánico. El estudio plantea un marco metodológico orientado a evaluar la repetibilidad intraequipo, la reproducibilidad interlaboratorio y la comparabilidad interinstrumental entre distintas plataformas de detección, considerando además la influencia del color del material y de la preparación de muestra mediante análisis estadístico de la varianza. Se trabajará con fibras postindustriales con contenido superior al 95 % de algodón, en tres categorías cromáticas representativas: natural, negro e índigo. El diseño incorpora muestras comunes distribuidas entre participantes y un gradiente controlado de severidad estructural previamente caracterizado, definido entre 300 y 1200 neps. La propuesta no pretende establecer equivalencias metrológicas directas entre equipos, sino generar una base experimental reproducible para futuros ejercicios intercomparativos orientados a la estandarización progresiva de procedimientos de medición aplicables a fibras recicladas.

**Palabras clave:** Algodón, reciclado mecánico, Neps, R&R, Caracterización, fibras recicladas, Control de calidad, Estandarización, normalización.

## INTRODUCCIÓN

El incremento del uso de fibras de algodón reciclado mecánicamente en aplicaciones de hilatura ha desplazado el foco desde la mera viabilidad técnica del material hacia la necesidad de garantizar su caracterización mediante parámetros estructurales comparables a los empleados tradicionalmente en algodón virgen. En este contexto, la evaluación fiable de estructuras tipo nep adquiere especial relevancia por su influencia sobre la procesabilidad en hilatura, la regularidad del hilo y la apariencia final del producto textil (Will y Aslan, 2023; Chakrabortty et al., 2025; Badara et al., 2025).

La medición de neps constituye un parámetro clave en la caracterización de fibras de algodón, especialmente en etapas previas a la hilatura, donde su presencia se asocia

con irregularidades en los procesos de apertura, cardado y estiraje. Sin embargo, los sistemas instrumentales disponibles han sido desarrollados mayoritariamente para algodón virgen, donde la detección de neps se relaciona con agregados fibrosos compactos y fragmentos asociados a la cutícula de la semilla (Bleyer et al., 2023; Uster Technologies AG, 2025). En fibras recicladas mecánicamente, los procesos de desfibrado y apertura progresiva generan morfologías más heterogéneas, por lo que no puede asumirse una equivalencia funcional directa respecto a los neps convencionales (Badara et al., 2025; Lindström et al., 2024).

La introducción de nuevos sistemas ópticos de medición ha ampliado las capacidades de evaluación en entornos industriales, pero su aplicación a fibras recicladas no cuenta todavía con una validación específica suficiente. Además, no existen protocolos intercomparativos estructurados que permitan evaluar de forma sistemática la comparabilidad interinstrumental ni la reproducibilidad interlaboratorio en la medición de estructuras tipo nep en algodón reciclado mecánicamente (Asociación Española de Normalización, 2023; Drieling et al., 2025).

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño experimental de un estudio intercomparativo orientado a establecer una base metodológica reproducible para la evaluación de la repetibilidad, la reproducibilidad y la comparabilidad funcional entre sistemas instrumentales de detección de estructuras tipo nep en fibras recicladas.

## MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### Material experimental

El material experimental consistirá en fibras de algodón reciclado mecánicamente con un contenido de algodón superior al 95 %, procedentes de residuos textiles postindustriales generados en etapas de confección. Esta corriente de entrada resulta representativa de procesos industriales de reciclado mecánico orientados a aplicaciones de hilatura, al tratarse de materiales previamente transformados en estructuras textiles y posteriormente sometidos a apertura y desfibrado. La procedencia del material se mantendrá controlada y no se incorporará como factor experimental independiente.

Las fibras se evaluarán directamente tras el proceso de desfibrado mecánico, sin operaciones posteriores de cardado, paralelización o preparación secundaria. Esta decisión permitirá preservar la morfología característica del reciclado mecánico y mantener la representatividad del material respecto a condiciones industriales reales de evaluación previa a hilatura.

Se seleccionarán tres categorías cromáticas representativas: natural, negro e índigo. Estas categorías permitirán cubrir diferentes condiciones de reflectancia superficial e historiales de procesado textil previo. En particular, la categoría índigo presentará una apariencia tipo melange, derivada de la mezcla de fibras blancas, azules claras y azules oscuras procedentes de distintos componentes del material original.

### Diseño experimental y variables del estudio

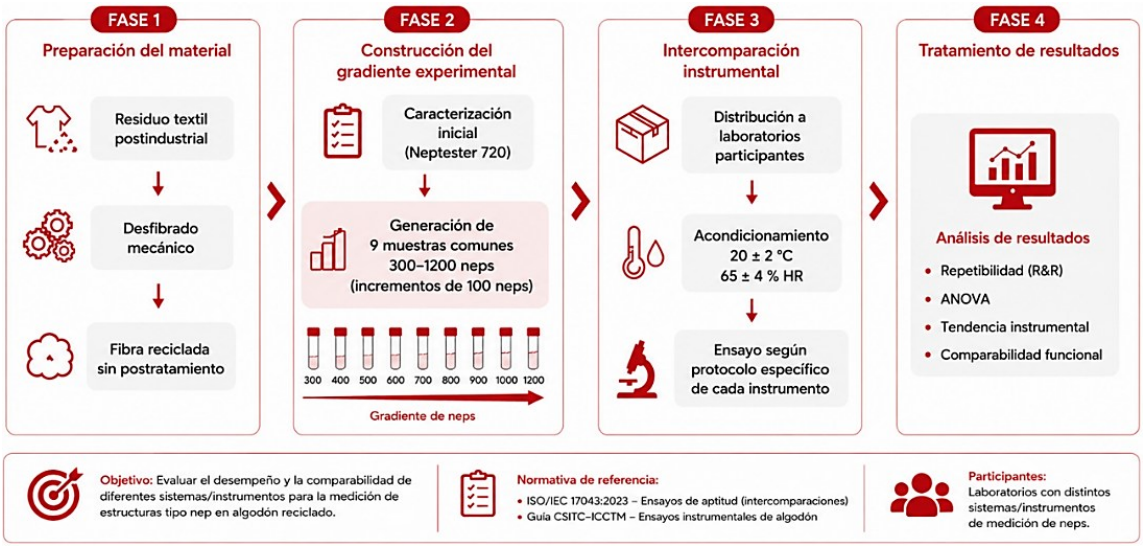
El estudio se planteará como un diseño intercomparativo exploratorio, orientado a evaluar la comparabilidad interinstrumental en la detección de estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente. La campaña experimental ha sido diseñada, pero no se ha ejecutado en el momento de redacción del presente manuscrito. Por tanto, el trabajo no tendrá como objetivo establecer una validación definitiva entre plataformas, sino definir una base experimental reproducible para futuras etapas de armonización.

El gradiente estructural se definirá mediante nueve muestras intercomparativas entre 300 y 1200 neps, caracterizadas previamente con USTER® NEP TESTER 720 como referencia operativa, debido a su uso histórico en la evaluación interna del contenido de neps y a su correlación operativa previa con AFIS Pro 2, sin considerarlo método de referencia metrológica.

La unidad experimental se definirá como la submuestra de fibra acondicionada en atmósfera estándar de ensayo textil y preparada conforme al protocolo operativo requerido por cada sistema instrumental. La preparación de muestra se considerará una variable experimental independiente, dado que los equipos requieren formatos de alimentación y masas de ensayo diferentes según su principio de medida.

El diseño se estructurará a partir de cuatro factores principales: sistema instrumental, categoría cromática, protocolo de preparación de muestra y repetición de medida. La variable principal corresponderá al recuento de estructuras tipo nep o a la señal instrumental equivalente proporcionada por cada equipo. El análisis previsto permitirá evaluar repetibilidad intraequipo, reproducibilidad interlaboratorio intramodelo, comparabilidad interinstrumental, influencia de los factores experimentales mediante ANOVA y coherencia funcional frente al gradiente estructural definido (Figura 1).

**Figura 1.** Esquema general del diseño intercomparativo propuesto para la evaluación de estructuras tipo nep de algodón reciclado mecánicamente.




## Sistemas instrumentales

Para la caracterización comparativa de estructuras tipo nep se seleccionarán sistemas instrumentales representativos de distintos principios de detección: apertura y clasificación digital de impurezas, análisis optoelectrónico individualizado de fibras y medición rápida de neps. La comparación entre sistemas se interpretará como coherencia funcional de respuesta frente al gradiente estructural definido, y no como equivalencia metrológica directa entre plataformas.

La descripción de los principios de detección y de las salidas analíticas principales se ha elaborado a partir de documentación técnica de los fabricantes (Uster Technologies, Inc., 2008; Uster Technologies AG, 2014, 2017, 2022, 2025; Woerner et al., 2025; Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG, s. f., 2022).

**Tabla 1.** Sistemas instrumentales considerados en el diseño intercomparativo, principio de detección y salida analítica principal.

| Sistema instrumental | Principio físico de detección | Definición operativa / salida analítica principal |
|---|---|---|
| Textechno MDTA-4 + CLIF | Apertura, separación de fracciones e clasificación digital basada en imagen | Recuento y tamaño de neps, identificación de restos de hilo, trash y fracción non-lint |
| USTER® AFIS 6 | Individualización de fibras y detección optoelectrónica de entidades discretas en flujo de fibras | Neps, neps fibrosos, seed-coat neps, longitud, fibra corta, finura, madurez, polvo, trash y materia extraña visible |
| USTER® AFIS Pro 2 | Individualización aerodinámica de fibras y detección optoelectrónica de entidades discretas en flujo de fibras | Neps, neps fibrosos, seed-coat neps, longitud, fibra corta, polvo, trash y materia extraña visible |
| USTER® LVI 920 | Medición óptica volumétrica rápida en muestra preparada. Rango nominal: algodón 100 % natural, blanco o crema | Recuento de neps, tamaño medio y estadísticos básicos de repetibilidad |
| USTER® NEP TESTER 720 | Individualización mecánica de fibras mediante sistema de aire y análisis del contenido de neps | Lectura numérica directa, sin informe documental |

## ESTRATEGIA DE MEDICIÓN Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

El tratamiento de los datos se orientará a evaluar la estabilidad de la respuesta instrumental, la reproducibilidad entre laboratorios y la coherencia funcional de cada sistema frente al gradiente estructural definido. Para cada combinación muestra y sistema instrumental se realizarán cinco réplicas independientes, a partir de muestras comunes distribuidas entre los participantes. Esta estrategia permitirá estimar la variabilidad asociada a la repetición de medida, al comportamiento heterogéneo del material reciclado y a los procedimientos operativos propios de cada plataforma.

La repetibilidad intraequipo se evaluará a partir de la dispersión observada entre réplicas obtenidas con un mismo sistema instrumental bajo condiciones controladas. La reproducibilidad se analizará entre laboratorios que dispongan de equipos del mismo modelo, con el objetivo de estimar la variabilidad atribuible al entorno operativo, la preparación de muestra y la ejecución del ensayo. Este enfoque se estructurará como un análisis de repetibilidad y reproducibilidad, R&R, aplicado al contexto intercomparativo del estudio.

Dado que los sistemas incluidos no generarán necesariamente salidas analíticas equivalentes desde el punto de vista metrológico, la comparabilidad interinstrumental no se evaluará como coincidencia directa de valores absolutos. El análisis se centrará en la dispersión relativa, la evolución de la respuesta frente al gradiente de severidad estructural y la coherencia funcional entre plataformas, evitando establecer jerarquías metrológicas o valores verdaderos convencionales en ausencia de materiales de referencia certificados.

La influencia de los factores experimentales se analizará mediante análisis de la varianza, ANOVA, considerando como factores principales el sistema instrumental, la categoría cromática, el protocolo de preparación de muestra y la repetición de medida. Antes de aplicar contrastes paramétricos, se verificará el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Si estos supuestos no resultan adecuados, se emplearán métodos no paramétricos o robustos equivalentes, seleccionados en función de la estructura final de los datos.

Adicionalmente, se analizará la coherencia monotónica entre la respuesta instrumental y el gradiente estructural comprendido entre 300 y 1200 neps. Cuando la estructura de datos lo permita, se calcularán indicadores asociados a la capacidad discriminante del sistema de medición, como el índice de discriminación, DR, y el número de categorías distinguibles, ndc. Valores bajos de ndc se interpretarán como una capacidad limitada del sistema para diferenciar niveles de severidad estructural. El tratamiento estadístico se realizará mediante Statgraphics Centurion 19.

## CONTRIBUCIÓN METODOLÓGICA E HIPÓTESIS DE TRABAJO

La principal contribución metodológica del estudio reside en la definición de un diseño intercomparativo reproducible para evaluar la respuesta de distintos sistemas instrumentales frente a estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente. El diseño se apoya en el uso de muestras comunes, un gradiente controlado de severidad estructural y una estrategia estadística orientada a separar repetibilidad, reproducibilidad y comparabilidad funcional entre plataformas.

La hipótesis principal del trabajo plantea que los sistemas evaluados presentarán una respuesta funcionalmente coherente frente al gradiente estructural definido, aun cuando no generen magnitudes analíticas directamente equivalentes. De esta hipótesis se derivan tres supuestos específicos: que cada sistema mostrará niveles aceptables de repetibilidad intraequipo; que los equipos serán capaces de detectar incrementos progresivos en el contenido de estructuras tipo nep; y que las plataformas mantendrán una coherencia monotónica suficiente para ordenar las muestras de forma comparable según su severidad estructural. De forma exploratoria, se considerará que la categoría cromática del material podrá influir en la respuesta de los sistemas basados en principios ópticos u optoelectrónicos.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo plantea un diseño experimental intercomparativo para evaluar la respuesta de distintos sistemas instrumentales en la medición de estructuras tipo nep en fibras de algodón reciclado mecánicamente. La propuesta se basa en el uso de muestras comunes, un gradiente controlado de severidad estructural y una estrategia de análisis orientada a valorar repetibilidad, reproducibilidad y coherencia funcional entre plataformas. El enfoque definido resulta especialmente relevante ante la ausencia de materiales de referencia certificados y de protocolos armonizados específicos para la caracterización de estructuras tipo nep en fibras recicladas. La comparación no se plantea como una equivalencia metrológica directa entre equipos, sino como una evaluación de sensibilidad relativa y consistencia de respuesta frente al gradiente experimental. La ejecución posterior del diseño permitirá avanzar hacia criterios metodológicos comunes y futuros ejercicios interlaboratorio aplicables a entornos industriales y colaborativos.

## REFERENCIAS


[1] Will, Michael; Aslan, Çagdas. "Enhancing Recycled Ring Yarn Quality: Unlocking the Potential of Recycled Cotton Blends with the Combed Process". https://www.rieter.com

[2] Chakrabortty, Amit; Khan, Siyam Quddus; Hossen, Jamal; Saha, Subrata Kumar; Shakib, Muaj Mohammad (2025). "An approach to choose the suitable blend ratio of virgin cotton, pre-consumer, and spinning process wastes for rotor-spun yarn using an analytic hierarchy process". Journal of Industrial Textiles, v. 55, p.p. 1-29. https://doi.org/10.1177/15280837251349690

[3] Badara, Olamide; Rämö, Virpi; Rissanen, Marja; Tehrani-Bagha, Ali (2025). "Mechanically recycled textile fibers in carded and needle-punched non-wovens: Implications on processability, structure, and performance". Textile Research Journal, v. 95, n. 13-14, p.p. 1617-1636. https://doi.org/10.1177/00405175241302482

[4] Bleyer, Sophie; Crivelli, Floriano; Peters, Gabriela; Ritter, Theresa; Schleth, Anja (2023). "USTER® Sustainability Bulletin No. 1. Definitions, standards, and textile knowledge for recycled material". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[5] Uster Technologies AG (2025). "USTER® AFIS 6. The fiber process control system. Technical Data". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[6] Lindström, Katarina; van der Holst, Floor; Berglin, Lena; Persson, Anders; Kadi, Nawar (2024). "Mechanical textile recycling efficiency: Sample configuration, treatment effects and fibre opening assessment". Results in Engineering, v. 24, p.p. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103252

[7] Asociación Española de Normalización (2023). "UNE-EN ISO/IEC 17043:2023. Conformity assessment. General requirements for the competence of proficiency testing providers". Madrid: UNE.

[8] Drieling, Axel; Gourlot, Jean-Paul; Knowlton, James (2025). "Guideline for Standardized Instrument Testing of Cotton". Washington D.C.: ICAC; Zurich: ITMF.

[9] Uster Technologies, Inc. (2008). "USTER® NEP TESTER 720 Instruction Manual. NEP Testing and Measurement System". Knoxville, TN: Uster Technologies, Inc.

[10] Uster Technologies AG (2014). "USTER® AFIS PRO 2 Application Handbook. Single fiber testing of cotton". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[11] Uster Technologies AG (2017). "USTER® LVI 920 Nep Tester. The cotton fiber analysis system. Technical Data". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[12] Uster Technologies AG (2022). "USTER® LVI 900 Series Operating Instructions". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[13] Woerner, Christine; Linthout, Jonathan; Xu, Peipei; Ritter, Theresa; Doenmez, Serap; Qaud, Mona (2025). "Uster AFIS Pro 2. Guidelines for testing mechanically recycled cotton fibers". Uster, Switzerland: Uster Technologies AG.

[14] Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG (s. f.). "MDTA 4. Automatic Fibre-Length-, Impurity- and Spinnability Tester". Mönchengladbach: Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG.

# Más allá del aula: Desarrollo de los resultados de aprendizaje mediante metodología sistémica en la formación profesional de comercio y marketing en el IES Cotes Baixes

**Blanes Nadal, Carolina Rosario** [(1)]

*(1) Departamento de economía y ciencias sociales. (Universidad Politécnica de València. Escuela Politécnica Superior de Alcoy. Plaza de Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi (Alacant) 03801. cablana@upvnet.upv.es*)

## RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto determinar la importancia de la pedagogía sistémica como herramienta para que el alumnado alcance los resultados de aprendizaje establecidos en la programación anual. El éxito laboral actual depende, no tanto de las competencias académicas, sino de las habilidades humanas y estratégicas que permiten al individuo adaptarse a entornos cambiantes.

En el contexto actual de transformación económica, tras la nueva ley orgánica de 3/2022 de 31 de marzo, así como el Real Decreto 659/2023 de 22 de Julio, la Formación Profesional ha dejado de ser un simple transmisor de destrezas técnicas para compartir tanto resultados de aprendizaje como competencias transversales.

Estas competencias no se enseñan, sino que se vivencian. Para ello, es imprescindible adoptar una metodología sistémica, un enfoque que entiende el aprendizaje como un conjunto de elementos interconectados, estudiante, centro educativo, familia y empresa en constante interacción.

Palabras clave: Pedagogía sistémica, Competencias transversales, Ordenes, Formación Profesional, Comunidad Valenciana.

## INTRODUCCIÓN

El enfoque sistémico permite considerar cada sistema como único, interconectado con el resto de los sistemas como una unidad compleja, que se organiza con sus propias reglas, las interacciones de sus componentes y sus conductas forman parte de un sistema de significados [1].

La Pedagogía Sistémica es la interrelación del proceso de trabajo personal de los docentes, el trabajo con los alumnos y la contextualización dentro de los órdenes del amor de ciertos contenidos curriculares a nivel educativo, junto con la necesaria inclusión de los padres de los alumnos dentro del proceso de educación" [2].

Solo un corazón agradecido puede aprender [3], y con el trabajo fenomenológico transgeneracional, está demostrado los beneficios académicos y emocionales, que debe incluir a los padres y aportar herramientas didácticas que posibilitan tanto a docentes como alumnos, a desarrollarse tanto a nivel personal como emocional en el contexto escolar.

Antes de profesores hemos sido alumnos, y antes de padres hijos, y entonces resulta crucial para este paradigma identificar, ordenar y asentir las etapas de los procesos vitales y honrar la historia y los padres propios; solo así podremos hacer lo mismo con nuestros alumnos [4].

Así pues, la vida es un proceso de enseñanza aprendizaje, y en este camino tanto el alumnado y sus familias, como la totalidad del sistema educativo, van a sufrir perturbaciones determinadas por su organización, esta misma contiene acuerdos relacionales o reglas prescritas, no explicitas, inconscientes, que limitan las conductas de los miembros de este.

El funcionamiento está encaminado a mantener su organización, a salvaguardar determinadas formas de convivencia y de apoyo mutuo. En el sistema familiar se han producido separaciones, muertes, exclusiones, y cada miembro mantiene el equilibrio de la organización [5].

En la infancia hay una evidente subordinación de los hijos a los padres, en la adolescencia y la pubertad se producen cambios hormonales y cognitivos que les permiten evaluar la realidad desde diferentes puntos de vista, se rebelan a las reglas y la figura de la autoridad suele estar devaluada o al menos relativizada. El conflicto y la individuación del adolescente puede seguir adelante, sin llegar a ninguna ruptura, objetivo que consiguen el 90% de las familias.

La competencia de los padres por orientar el desarrollo supone dos habilidades, por un lado, la sensibilidad a las demandas y necesidades de los hijos, y por otro la exigencia o capacidad por orientar hacia metas evolutivas.

Históricamente, la escuela ha priorizado la instrucción cognitiva y el control social en detrimento del desarrollo integral del individuo, el mundo de las emociones y los impulsos se vieron censurados y reprimidos.

En la sociedad actual, se ha producido un debilitamiento de los vínculos de parentesco, de los vínculos con la tierra, con la comunidad, con el desarraigo, el aislamiento, el individualismo, la desvinculación con los antepasados, falta de enraizamiento, así como falta de pertenencia e integración que afecta directamente a la convivencia y cohesión social [6].

La ausencia de un puente dialógico y colaborativo entre la escuela y la familia genera un vacío relacional que afecta directamente al alumnado. Al carecer de referentes sólidos y de una acción educativa coordinada, los estudiantes experimentan desorientación. Esta falta de límites y de cohesión institucional suele derivar en conductas de apatía, manifestaciones de omnipotencia y tiranía conductual [7].

Ante este escenario, resulta imperativo descentralizar la carga que soporta el centro educativo, ya que este no puede asumir de manera exclusiva la compensación de las crisis y transformaciones sociales. Es fundamental promover la implicación de los ámbitos comunitarios (ayuntamientos, planes de entorno e instituciones locales) para ofrecer formación y apoyo a las familias; es aquí donde se requiere la intervención del sector empresarial, siguiendo los modelos de conciliación de otros países europeos [8].

Mi intervención se contextualiza en un grupo-clase de segundo curso de Grado Medio integrado por 18 estudiantes. El análisis del grupo pone de manifiesto una notable heterogeneidad derivada tanto de la diversidad sociocultural del alumnado procedente de España, Marruecos, Perú y Francia como de las diferencias en el grado de madurez evolutiva, con un rango de edad comprendido entre los 17 y los 25 años. En este marco, la implementación de una metodología sistémica adquiere especial relevancia, al facilitar la construcción de un orden relacional y jerárquico que promueve la cohesión grupal y el sentimiento de pertenencia. De igual modo, la diversidad presente en el aula se interpreta como un recurso formativo que aproxima al alumnado a la realidad de los contextos laborales internacionales contemporáneos, caracterizados por su complejidad y multiculturalidad.

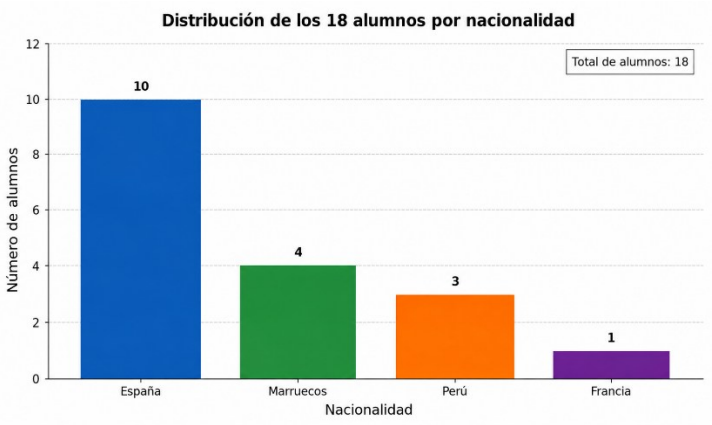



**Tabla 1:** Estructura del grupo clase. (Elaboración propia)

## OBJETIVOS

Para abordar tanto los resultados de aprendizaje como las competencias transversales bajo un enfoque sistémico, se considera fundamental establecer estrategias que favorezcan la participación e integración de las familias en el entorno educativo.

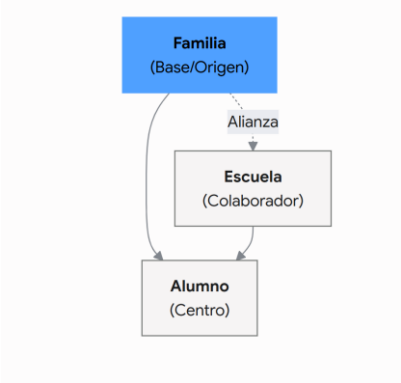



**Tabla 2:** Estructura de la metodología sistémica de la familia. (Elaboración propia)

De esta manera podemos demostrar cómo desde la aplicación del enfoque sistémico en la Formación Profesional se pueden desarrollar ambas en los alumnos, conectando el aprendizaje con su entorno real.

En cuanto a los objetivos específicos podemos establecer:

El primero se centra en ver la interacción entre alumnos, docentes y el sector productivo, esto permite una visión integral del aprendizaje, donde el todo es mayor que la suma de sus partes técnicas.

El segundo trata el aula como un sistema social, donde se desarrolla de forma natural habilidades como la comunicación asertiva, el pensamiento crítico y la adaptabilidad. El objetivo es explicar que estas habilidades no se enseñan de forma aislada, sino que emergen a través de las relaciones y procesos dentro del sistema pedagógico.

El tercero se focaliza en conectar el aprendizaje con la realidad profesional. Se trata de situar al alumno como una pieza clave dentro del engranaje socioeconómico de su comunidad.

El cuarto demuestra cómo esta estructura no solo mejora la capacitación técnica, sino que prepara al alumno para navegar en la complejidad del mundo laboral actual de manera exitosa

El quinto diseña estrategias pedagógicas para desarrollar la educación emocional del alumnado.

El sexto dota al alumnado de recursos cognitivos y herramientas socioemocionales que fortalece su capacidad de esfuerzo, resiliencia y adaptación ante contextos sociales cambiantes.

El séptimo favorece mediante la metodología sistémica, la reconciliación del alumnado con sus raíces e historia familiar como base para el fortalecimiento de su identidad y seguridad en el contexto escolar.

El octavo restablece el orden jerárquico institucional (Familia-Escuela-Alumno) a través de la delimitación clara de las funciones que corresponden a cada ámbito educativo.

El noveno construye puentes de comunicación basados en el respeto, la confianza mutua y la corresponsabilidad, disminuyendo los sentimientos de culpa, impotencia o desconfianza en los progenitores.

El décimo fomenta estrategias de cooperación activa, alianzas formativas y pactos de colaboración entre el centro educativo y las familias para evitar la delegación ciega de funciones parentales en la escuela.

## RESULTADOS

Antes de hablar de resultados es importante reconocer que el alumnado mantiene una lealtad primaria hacia su sistema familiar de origen. En consecuencia, cualquier intervención educativa requiere integrar y respetar la realidad familiar del estudiante, evitando posicionamientos de superioridad institucional o desautorización parental.

Los procesos de aprendizaje y adaptación escolar se ven favorecidos cuando existe coherencia entre los mensajes transmitidos por la familia y la escuela. Por el contrario, la ausencia de un puente relacional entre ambos sistemas genera inseguridad, conflicto interno y dificultades de aprendizaje en el alumnado.

Asimismo, el enfoque sistémico propone desplazar modelos centrados en la culpabilización hacia modelos de cooperación, donde las familias sean reconocidas como agentes fundamentales del proceso educativo. En este sentido, el profesorado actúa como figura complementaria y no sustitutiva de la función parental.

De los datos obtenidos en relación con la implementación del enfoque sistémico en alumnado de Formación Profesional, se pueden ver como en los resultados se muestran mejoras significativas en diferentes competencias personales y socioemocionales.

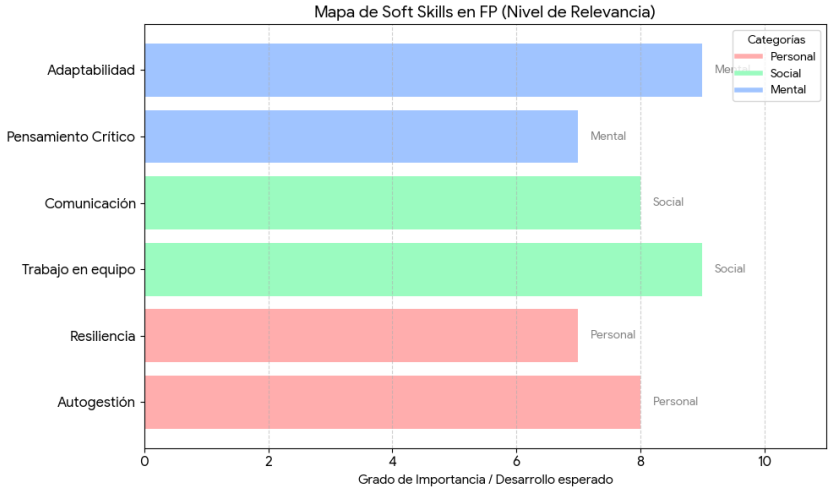



**Tabla 3**: Tipos de softskills desrrollados por la metodologia sistemica. (Elaboración propia)

Los datos obtenidos permiten realizar una comparación entre el desarrollo de diversas competencias del alumnado en contextos educativos con y sin enfoque sistémico.

En términos generales, se observa una mejora significativa en todas las dimensiones analizadas cuando se incorporan estrategias basadas en la pedagogía sistémica. En concreto, la autonomía y capacidad de decisión aumentan de 4 a 9 puntos, la madurez emocional de 3 a 8, el vínculo con raíces y valores de 5 a 9, la tolerancia a la frustración de 4 a 7, y la motivación y capacidad de esfuerzo de 3 a 8.

Estos resultados sugieren que la implementación de un enfoque sistémico en el ámbito educativo puede favorecer el desarrollo integral del alumnado. En particular, se aprecia un impacto relevante en dimensiones vinculadas a la identidad personal, la regulación emocional, la motivación académica y la construcción de vínculos significativos dentro del entorno educativo.

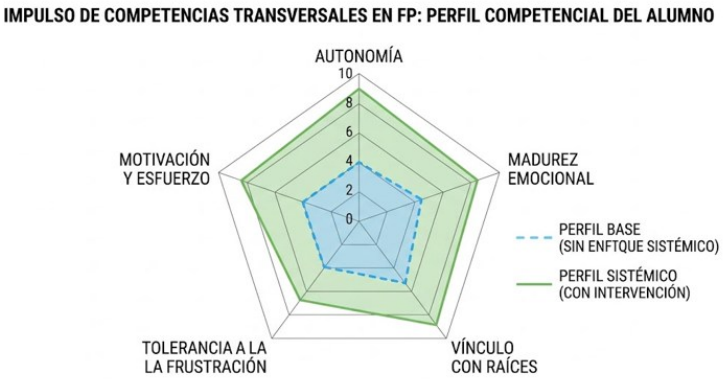



**Tabla 4:** Impulso de competencias transversales en la FP. (Elaboración propia)

## CONCLUSIONES

Un enfoque basado en la pedagogía sistémica se asocia con una mejora notable en todas las competencias analizadas del alumnado.

En comparación con el enfoque tradicional, se observan puntuaciones más altas en áreas como la autonomía, la madurez emocional, la motivación, la tolerancia a la frustración y el vínculo con valores y pertenencia.

En conjunto, los resultados apoyan la idea de que la pedagogía sistémica contribuye de manera favorable al desarrollo global del alumnado, especialmente en dimensiones emocionales, motivacionales y relacionales.

Se concluye con la necesidad de reforzar la comunicación con las familias respecto a la importancia de su participación y su colaboración en el proceso educativo, así como del impacto que su actitud hacia la institución ejerce en la configuración de un entorno escolar equilibrado.

Del mismo modo, se destaca la relevancia de promover el orden dentro de los sistemas de pertenencia, evitando dinámicas que favorezcan la desorganización. En este marco, el respeto por la jerarquía y la adecuada asunción de los roles correspondientes dentro del sistema se consideran elementos fundamentales para garantizar su funcionamiento armónico, favoreciendo la estabilidad relacional y el desarrollo integral de sus miembros.

## REFERENCIAS

[1] Franke-Gricksch, Marianne (2004): Eres uno de nosotros. Argentina. Alma Lepik
[2] Olvera, Angélica y Pastor, Amparo (2004):" Pedagogía sistémica con el enfoque de Bert Hellinger. Redes de amor y respeto en el aula", Revista mexicana de Pedagogía, 80, noviembre-diciembre, pp11-13.
[3] Hellinger, Bert y Hövel, Gabriele ten (2000): Reconocer lo que es. Barcelona. Herder.
[4] Pastor Bustamante, Amparo (2003): "Los adolescentes y sus educadores desde una perspectiva sistémica y evolutiva". Ponencia- coloquio en el Encuentro: Los adolescentes y sus emociones: Actitudes saludables para la vida, organizado por la Casa de la Juventud de las Rozas, Madrid. 10 de Mayo de 2003. Publicada en el libro de Ponencias de las Jornadas.
[5] Hellinger, Bert (2001) a: "Religión, Psicoterapia, cura de almas". Barcelona. Herder l.
[6] Hellinger, Bert (2001) b: "Órdenes del amor". Barcelona. Herder.
[7] Olvera, Angélica (2004): "Los conflictos de los alumnos en la escuela como una expresión de amor a su familia", Revista Mexicana de pedagogía, 77, mayo/junio, pp 10-12
[8] Pastor Bustamante, Amparo (2003): "Los adolescentes y sus educadores desde una perspectiva sistémica y evolutiva". Ponencia- coloquio en el Encuentro: Los adolescentes y sus emociones: Actitudes saludables para la vida, organizado por la Casa de la Juventud de las Rozas, Madrid. 10 de Mayo de 2003. Publicada en el libro de Ponencias de las Jornadas.

# Escuchar para captar: encuesta de nuevo ingreso y planificación comunicativa universitaria. El caso del Campus d'Alcoi de la UPV

**Lara Jornet, Ignacio[1], Lledó Montava, Rubén[2] y Mengual Vañó, Jose[3]**

*(1) DIRCOM Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, iglajor@upvnet.upv.es*
*(2) Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, prensa@epsa.upv.es*
*(3) Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, jomenva@upv.es*

## RESUMEN

La comunicación corporativa universitaria ha dejado de ser una suma de acciones promocionales para convertirse en un proceso estratégico de escucha, interpretación y respuesta a públicos diversos. Este trabajo analiza el caso del Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València (UPV), donde la planificación anual de marketing y comunicación orientada a futuros estudiantes se articula en torno a una encuesta aplicada al estudiantado de nuevo ingreso al inicio del curso. A partir de 537 respuestas, el estudio sostiene que las motivaciones reales de elección del centro deben condicionar la campaña del curso siguiente. Los resultados muestran el peso de la marca UPV, la calidad de vida y el menor coste del alojamiento, la cercanía, la recomendación interpersonal y la comunicación directa con institutos y familias. La propuesta metodológica transforma esos datos en mensajes y canales: prensa local, redes sociales, vídeos explicativos, jornadas de puertas abiertas, concursos tecnológicos y visitas a centros de Bachillerato y FP superior. Se concluye que la captación en universidades públicas periféricas o de tamaño medio mejora cuando la comunicación parte de evidencias internas y no solo de intuiciones institucionales.

**Palabras clave:** comunicación corporativa; marketing universitario; universidad pública; captación; estudiantado; encuesta; UPV; Campus d'Alcoi

## INTRODUCCIÓN

Las universidades públicas españolas compiten hoy en un ecosistema de atención saturada. La decisión de matricularse ya no se explica únicamente por la oferta académica o la nota de admisión, sino por una combinación de reputación institucional, expectativas familiares, percepción de empleabilidad, coste de vida, proximidad territorial, experiencia de campus y confianza generada por prescriptores cercanos. En este contexto, la comunicación corporativa no puede limitarse a "hacer visible" una titulación: debe construir relaciones, ordenar argumentos y convertir la escucha de sus públicos en planificación anual.

La literatura sobre marketing de educación superior subraya que las universidades operan en mercados cada vez más competitivos y deben comprender cómo los futuros estudiantes evalúan las instituciones antes de tomar una decisión [1]. En paralelo, los enfoques clásicos de marketing educativo recuerdan que la planificación exige investigar necesidades, segmentar públicos y traducir los atributos institucionales en propuestas de valor comprensibles [2]. Desde la comunicación corporativa, el modelo simétrico bidireccional de las relaciones públicas resulta especialmente útil para una universidad pública, porque desplaza el centro desde la emisión unilateral hacia la interacción con los públicos [3].

El Campus d'Alcoi de la UPV constituye un caso de interés por su condición de campus tecnológico integrado en una ciudad media, con una fuerte tradición industrial y una relación intensa con el entorno educativo y empresarial. La propia comunicación institucional del campus se apoya en atributos como la cercanía, la personalización, los

grupos reducidos, el trato directo con profesorado y estudiantado, y una experiencia universitaria asequible [5]. Estos rasgos, más que elementos decorativos, operan como ventajas diferenciales frente a campus ubicados en grandes capitales o con mayor escala.

El problema de investigación que plantea este trabajo es concreto: ¿cómo debe planificarse la comunicación anual de un campus público cuando el objetivo prioritario es atraer la atención de futuros estudiantes de Bachillerato y FP superior y, al mismo tiempo, responder a las dudas de sus familias? La tesis defendida es que la campaña del curso siguiente debe estar necesariamente vinculada a la opinión del estudiantado de primer curso. Quienes acaban de escoger el campus constituyen una fuente privilegiada para comprender qué mensajes funcionaron, qué canales generaron conocimiento y qué argumentos acabaron inclinando la decisión.

## OBJETIVOS

El objetivo general es demostrar la utilidad de la encuesta al estudiantado de nuevo ingreso como instrumento para diseñar un plan de comunicación corporativa orientado a la captación universitaria en el Campus d'Alcoi de la UPV.

Como objetivos específicos, se plantean los siguientes: a) identificar los factores declarados por el estudiantado para elegir el campus; b) relacionar esos factores con mensajes comunicativos aplicables a la campaña del curso siguiente; c) ordenar las acciones anuales de comunicación —prensa, redes sociales, vídeos, visitas a institutos, concursos y jornadas de puertas abiertas— dentro de una lógica estratégica común; y d) proponer un modelo de retroalimentación que permita evaluar y reajustar cada campaña a partir de datos obtenidos al inicio del curso.

## METODOLOGÍA

La investigación adopta un enfoque de estudio de caso aplicado. El objeto de análisis es la planificación comunicativa del Campus d'Alcoi de la UPV orientada a futuros estudiantes y familias. El material empírico principal procede de una encuesta realizada en septiembre, durante los primeros días de incorporación del estudiantado de nuevo ingreso. La muestra disponible alcanza 537 respuestas (en este caso, se realiza en septiembre de 2026), cifra suficiente para obtener una radiografía operativa de los motivos de elección y de los canales de conocimiento del campus [7,8].

El cuestionario combina preguntas cerradas y abiertas. Las cerradas permiten cuantificar aspectos como la motivación de elección, la forma de conocer el campus, la asistencia a jornadas de puertas abiertas, la movilidad o el tipo de alojamiento. Las abiertas recogen formulaciones espontáneas del estudiantado y permiten detectar expresiones de alto valor comunicativo: "por cercanía", "por recomendación", "el alquiler es más barato", "me parecía muy acogedor" o "por la cercanía de los profesores".

El procedimiento de análisis se organiza en tres fases. En primer lugar, se agrupan las respuestas en categorías comunicativas: prestigio de marca, coste de vida, cercanía territorial, cercanía docente, recomendación, imposibilidad de acceso a primera opción y atractivo de la titulación. En segundo lugar, se vincula cada categoría con un público prioritario: estudiantes de Bachillerato, estudiantes de FP superior, familias, orientadores y centros educativos. En tercer lugar, se traduce cada hallazgo en mensajes, formatos y canales de campaña. Este planteamiento no persigue producir una estadística generalizable al sistema universitario español, sino una herramienta de toma de decisiones replicable en contextos institucionales similares.

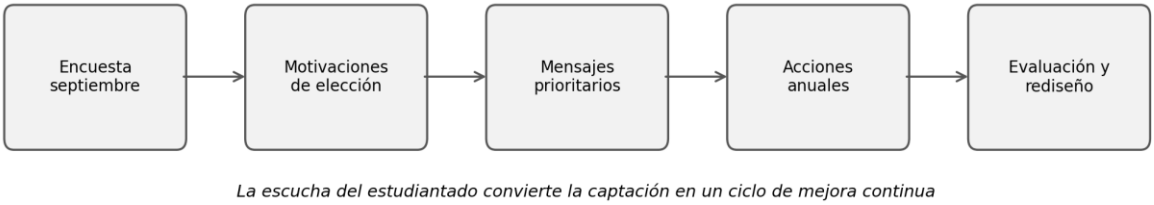



**Figura 1.** Modelo de retroalimentación entre encuesta de nuevo ingreso y planificación anual de comunicación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la elección del campus responde a una combinación de motivos racionales, emocionales y contextuales. El documento de síntesis indica que el 30,7% del estudiantado señala el prestigio de la marca UPV y de sus titulaciones como factor determinante; el 18,2% valora la calidad de vida en Alcoy y el menor coste del alojamiento; el 66,1% vive en piso compartido, lo que evidencia la procedencia no estrictamente local de una parte relevante de la muestra; y el 38% se desplaza en coche, frente a un 31,1% que utiliza el autobús [8]. Estos datos son especialmente valiosos porque permiten comunicar el campus no solo como una opción académica, sino como una experiencia viable de vida universitaria.

La pregunta abierta sobre por qué se ha escogido el Campus d'Alcoi aporta una capa interpretativa que no siempre aparece en los porcentajes. Las respuestas se repiten alrededor de tres campos semánticos: proximidad, recomendación y acogida. La cercanía geográfica aparece de forma recurrente, pero también la cercanía simbólica: un campus "acogedor", con "buenas opiniones" y con percepción de trato próximo. En términos de comunicación, estas palabras no deberían verse como anécdotas, sino como material estratégico: revelan cómo el público percibe el valor del campus y qué lenguaje utiliza para explicarlo.

También se observa que la decisión no se produce en soledad. Las familias intervienen de forma directa en la evaluación del coste de alojamiento, seguridad, transporte y expectativas de futuro. Por ello, las acciones de captación no pueden dirigirse únicamente al estudiante que consume redes sociales. Deben combinarse mensajes juveniles, visuales y ágiles con argumentos pensados para padres, madres y tutores: precio del alquiler, accesibilidad, acompañamiento, empleabilidad, prestigio institucional y vida universitaria en una ciudad de escala manejable.

La vía por la que el futuro estudiantado conoce el campus confirma la importancia de salir del espacio estrictamente universitario. En los resultados disponibles, la presencia del campus en institutos o colegios aparece como el canal con mayor peso, con un 51% en la pregunta sobre cómo se conoció el Campus d'Alcoi; le siguen otras vías como los medios de comunicación, las redes sociales y las jornadas de puertas abiertas [7]. Este dato refuerza la necesidad de planificar durante todo el año acciones presenciales en centros de Bachillerato y FP superior, y no concentrar la campaña solo en el periodo de preinscripción.

Las jornadas de puertas abiertas presentan un doble valor. Por una parte, funcionan como experiencia de prueba: permiten recorrer instalaciones, laboratorios, espacios deportivos y conocer testimonios reales de estudiantes y profesorado, tal como plantea la comunicación institucional de la UPV [6]. Por otra parte, los resultados muestran que no toda la muestra las conoce o las utiliza; en el documento de encuesta, un 12,1%

afirma que la visita al pabellón de abril ayudó a decidirse, mientras que un 71,3% indica que no asistió y un 13,4% declara no saber qué es [7]. La lectura comunicativa es clara: las jornadas son útiles, pero su notoriedad debe trabajarse antes y mejor, especialmente entre familias y orientadores.

**Tabla 1.** Traducción comunicativa de los principales hallazgos de la encuesta.

| Hallazgo | Lectura comunicativa | Público prioritario | Aplicación en campaña |
|---|---|---|---|
| Prestigio UPV y titulaciones (30,7%) | La marca institucional reduce incertidumbre y legitima la elección. | Estudiantado y familias | Prensa, vídeos de titulaciones y mensajes de solvencia académica. |
| Calidad de vida y menor coste (18,2%) | Alcoy se percibe como destino universitario asequible. | Familias y estudiantes de fuera | Piezas sobre alojamiento, ciudad, transporte y vida universitaria. |
| Cercanía, acogida y trato docente | El tamaño del campus se convierte en ventaja relacional. | Futuros estudiantes | Testimonios, reels, visitas guiadas y contenidos con profesorado. |
| Recomendación y boca-oreja | La confianza circula a través de iguales y prescriptores. | Estudiantes, egresados, orientadores | Embajadores, casos reales y activación de comunidad. |
| Institutos/colegios como canal clave (51%) | La captación empieza antes de la preinscripción. | Bachillerato y FP superior | Calendario anual de charlas, concursos y talleres tecnológicos. |

A partir de estos hallazgos, la campaña anual no debería estructurarse como una colección de impactos inconexos, sino como un relato acumulativo. Los concursos de robótica y otras actividades tecnológicas muestran el campus como espacio de experimentación y vocaciones STEM; los posts de Instagram y TikTok sirven para traducir ese relato al lenguaje cotidiano del futuro estudiantado; los vídeos explicativos permiten resolver dudas sobre titulaciones y salidas profesionales; la publicidad en prensa local y comarcal aporta legitimidad ante familias; y las jornadas de puertas abiertas convierten los mensajes en experiencia física.

La clave está en que cada acción responda a una evidencia. Si el boca-oreja y la recomendación aparecen como motivo de elección, la campaña debe incorporar testimonios de estudiantes reales. Si el coste del alojamiento y la calidad de vida son relevantes, los mensajes deben presentar Alcoy como ciudad universitaria posible, no solo como ubicación del campus. Si la cercanía con el profesorado es un atributo percibido, conviene mostrarlo con rostros y situaciones concretas. Si la visita a institutos es el canal más eficaz, la planificación debe comenzar en septiembre, no en abril. Y si las familias participan en la decisión, la comunicación debe ofrecerles información específica, evitando tratarlas como público secundario.

Este enfoque sitúa la comunicación corporativa en un plano de gestión. No se trata únicamente de producir contenidos atractivos, sino de decidir qué atributos se enfatizan, para quién, con qué tono, en qué momento del año y en qué canal. La encuesta actúa como brújula y, a la vez, como mecanismo de rendición de cuentas: permite comprobar si los mensajes que la institución cree diferenciales coinciden con los atributos que el estudiantado realmente valora. Cuando existe alineación, la campaña gana autenticidad; cuando no existe, aparece una oportunidad de corrección.

En universidades públicas, este punto es especialmente relevante. La captación no puede entenderse como una lógica puramente comercial, sino como una función pública de orientación, información y acceso. La comunicación debe ayudar a que el futuro estudiantado tome decisiones fundamentadas y a que las familias comprendan las condiciones reales de la experiencia universitaria. En el caso analizado, el valor diferencial del campus se construye en la intersección entre reputación tecnológica, escala humana, coste de vida, comunidad y presencia territorial.

## PROPUESTA DE PLANIFICACIÓN ANUAL

El modelo propuesto articula el calendario comunicativo en cuatro momentos. El primero corresponde a septiembre y octubre, cuando se realiza la encuesta al nuevo estudiantado, se analizan las respuestas y se detectan mensajes emergentes. Este periodo debe servir para generar el "briefing" de campaña del curso siguiente: públicos, argumentos, objeciones, canales y formatos.

El segundo momento se desarrolla entre noviembre y febrero. Es la fase de generación de confianza temprana. Aquí encajan contenidos de posicionamiento institucional, vídeos cortos de titulaciones, presencia en redes sociales, noticias en prensa sobre proyectos del campus, participación de estudiantes en concursos de robótica y tecnología, y coordinación con orientadores de institutos. La lógica no es aún la matrícula, sino la familiaridad: que el campus entre en el mapa mental de quienes decidirán meses después.

El tercer momento se concentra entre marzo y mayo, coincidiendo con jornadas de puertas abiertas, visitas de centros, eventos demostrativos y acciones dirigidas a familias. La comunicación debe ser más explicativa y experiencial: qué se estudia, cómo son los laboratorios, qué salidas existen, cuánto cuesta vivir en Alcoy, cómo se llega al campus, cómo es el trato docente y qué servicios acompañan la vida universitaria.

El cuarto momento se sitúa entre junio y julio, en el periodo de preinscripción. La comunicación debe resolver dudas operativas, reforzar atributos diferenciales y acompañar la toma de decisión. En esta fase, la publicidad en prensa y los posts en redes no deberían repetir mensajes genéricos, sino insistir en las motivaciones validadas por la encuesta: prestigio UPV, campus cercano, calidad de vida, coste asumible, trato directo y testimonios de quienes ya eligieron Alcoy.

La planificación se cierra con una evaluación en septiembre, cuando una nueva cohorte responde al cuestionario. De este modo, cada campaña deja de ser un producto terminado y se convierte en una hipótesis que se contrasta con la experiencia real de elección. Este ciclo anual permite pasar de la intuición a la evidencia y de la promoción puntual a la comunicación estratégica.

## CONCLUSIONES

El caso del Campus d'Alcoi de la UPV muestra que la comunicación corporativa aplicada a universidades públicas puede ganar eficacia cuando se fundamenta en la escucha sistemática del estudiantado de nuevo ingreso. La encuesta realizada al inicio del curso no solo describe perfiles; permite comprender por qué se elige el campus y, por tanto, qué argumentos deben estructurar la campaña del curso siguiente.

Los datos analizados permiten sostener la tesis inicial: la planificación comunicativa debe estar vinculada a las motivaciones declaradas por quienes acaban de tomar la decisión de matricularse. En el caso estudiado, la marca UPV, la calidad de vida, el menor coste del alojamiento, la cercanía geográfica y docente, la recomendación interpersonal y la presencia en institutos constituyen ejes de comunicación con capacidad para articular acciones durante todo el año.

La principal aportación del trabajo es proponer un modelo de retroalimentación aplicable a campus públicos de tamaño medio: escuchar en septiembre, interpretar en clave comunicativa, convertir hallazgos en mensajes, desplegar acciones multicanal y volver a medir con la siguiente cohorte. Este enfoque evita que la captación dependa de campañas aisladas o de intuiciones internas, y permite que prensa, redes sociales, vídeos, concursos tecnológicos, visitas a institutos y jornadas de puertas abiertas compartan una misma arquitectura estratégica.

Como limitación, el estudio se basa en un caso concreto y en datos internos no concebidos inicialmente como investigación académica comparada. Futuras líneas de trabajo podrían incorporar entrevistas a familias, orientadores y estudiantes que finalmente eligieron otros campus, así como un seguimiento longitudinal para comprobar qué mensajes tienen mayor impacto en la conversión final. Aun así, el caso evidencia una idea central: en comunicación universitaria, escuchar bien también capta. Y eso, para un campus público, no es postureo; es gestión inteligente.

## REFERENCIAS

[1] Hemsley-Brown, Jane; Oplatka, Izhar (2006). "Universities in a competitive global marketplace: A systematic review of the literature on higher education marketing". International Journal of Public Sector Management, v. 19, n. 4, p.p. 316-338. https://doi.org/10.1108/09513550610669176

[2] Kotler, Philip; Fox, Karen F. A. (1995). Strategic Marketing for Educational Institutions. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. ISBN: 978 0136689898

[3] Grunig, James E.; Hunt, Todd (1984). Managing Public Relations. New York: Holt, Rinehart and Winston. ISBN: 978 0030583377

[4] Capriotti, Paul (1999). Planificación estratégica de la imagen corporativa. Barcelona: Ariel. ISBN: 978 8434412750

[5] Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València. Escuela Politécnica Superior de Alcoy. https://www.upv.es/entidades/epsa/

[6] Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València (2026). Jornadas de Puertas Abiertas Campus de Alcoy de la UPV 2025-2026: formulario de inscripción de centros. https://www.upv.es/entidades/epsa/2026/02/02/jornadas-de-puertas-abiertas-campus-de-alcoy-de-la-upv-2025-2026-formulario-de-inscripcion-de-centros/

[7] Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València (2025). Encuesta al estudiantado de nuevo ingreso: motivos de elección y canales de conocimiento del campus. Documento interno no publicado.

[8] Campus d'Alcoi de la Universitat Politècnica de València (2025). Radiografía del estudiantado de nuevo ingreso en el Campus d'Alcoi de la UPV. Documento interno no publicado.

# Propiedades mecánicas y de compostabilidad de biopolímeros de pectina obtenidos mediante extrusión e inyección

**Silvestre-Botella, Jordi [(1)], Peñafiel-Alvarado, Jorge, [(1,2)], Sánchez-Nacher, Lourdes [(1)], Quiles-Carrillo, Luis [(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoi, Alacant, España, jsilbot@epsa.upv.es*

*(2) Pontificia Universidad Católica del Ecuador – Ibarra (PUCE – Ibarra), Av. Jorge Guzmán Rueda y Av. Padre Aurelio Espinoza Polit, Ibarra, 100112, Ecuador, jipenafiel@pucesi.edu.ec*

## RESUMEN

Este proyecto explora el aprovechamiento de la pectina como materia prima para la obtención de biopolímeros procesables mediante técnicas industriales convencionales, como la extrusión y la inyección. Para ello, se diseñaron mezclas de pectina con diferentes plastificantes, tanto de origen natural como comercial, orientadas a mejorar su capacidad de procesado y a potenciar propiedades esenciales como la ductilidad y la resistencia mecánica.

Las formulaciones desarrolladas serán objeto de una caracterización exhaustiva que abarcará ensayos mecánicos, térmicos, dinámico-mecánicos, espectroscópicos y morfológicos, junto con pruebas de absorción de agua y evaluación de su biodegradabilidad bajo condiciones de compostaje. Con este enfoque, se pretende superar las limitaciones actuales de la pectina, cuyo uso ha quedado históricamente restringido a films y recubrimientos, abriendo la puerta a su aplicación en ámbitos de gran interés estratégico como el envase y el embalaje sostenible. Los resultados obtenidos permitirán identificar las formulaciones con mayor potencial industrial y sentar las bases de futuras líneas de investigación centradas en el desarrollo de bioplásticos de alto rendimiento medioambiental.

**Palabras clave:** Pectina, plastificantes, residuos cítricos, biopolímeros, extrusión, inyección.

## INTRODUCCIÓN

La producción mundial de plásticos ha experimentado un crecimiento continuo desde las 1,5 millones de toneladas registradas en 1950 hasta superar los 400 millones de toneladas en 2022. Este crecimiento, impulsado principalmente por el sector del envase y el embalaje, se sustenta casi en su totalidad en materias primas de origen fósil. Aproximadamente el 14% del petróleo extraído anualmente se destina a la fabricación de plásticos [1], generando alrededor de 3,5 kg de $CO_2$ por kilogramo de plástico virgen producido, lo que representa ya el 3,4% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

A esto se suma el grave problema de la gestión al final de su vida útil, apenas el 10% de los plásticos producidos se recicla, mientras que la mayoría acaba en vertederos o son incinerados, con los consiguientes impactos sobre ecosistemas terrestres y marinos.

Se estima que entre 8 y 10 millones de toneladas de plástico llegan anualmente al océano, con efectos físicos, químicos y biológicos documentados sobre la biodiversidad y la salud humana.

Ante este escenario, los biopolímeros emergen como una alternativa sostenible. Se define como biopolímero todo aquel que es de origen renovable, biodegradable, o que cumple ambas condiciones. Entre sus ventajas frente a los polímeros convencionales destacan sus mínimas emisiones de $CO_2$ y su capacidad para valorizar residuos sólidos y agroalimentarios, integrándose en el marco de la economía circular y la biorrefinería.

En este contexto, los residuos de la industria citrícola representan una materia prima de gran potencial. España es el mayor productor de cítricos de Europa, y la Comunidad Valenciana aporta en torno al 2% de la producción mundial. El procesado industrial de estos frutos genera grandes cantidades de cáscaras, pulpa y semillas, subproductos ricos en compuestos de alto valor añadido como la pectina, un heteropolisacárido estructural presente en la pared celular de las plantas con un contenido de entre el 20 y el 30% en base seca en pieles de cítricos.

La pectina presenta propiedades destacadas para su uso como bioplástico, es biodegradable, renovable y forma geles y películas funcionales. Sin embargo, en estado seco es un material rígido y frágil, lo que exige el uso de plastificantes, como el glicerol, para conferirle procesabilidad y comportamiento termoplástico. Hasta la fecha, los materiales basados en pectina han sido procesados principalmente mediante técnicas como *solvent casting* o termo-compresión, con aplicaciones centradas en el envasado de alimentos. Existe, no obstante, una laguna crítica en la literatura científica, ningún estudio ha procesado biopolímeros de pectina mediante extrusión e inyección, las técnicas predominantes en la fabricación industrial de piezas plásticas. Esta ausencia limita severamente la escalabilidad y viabilidad industrial de estos materiales.

El presente trabajo aborda, por primera vez, el desarrollo de biopolímeros basados en pectina compatibles con procesos de extrusión e inyección, con el objetivo de ampliar su aplicación a sectores que requieren producción a gran escala y consolidar la pectina como una alternativa real a los plásticos de origen petroquímico.

## OBJETIVOS

El objetivo principal del siguiente trabajo es desarrollar biopolímeros a partir de pectina, evaluando su procesabilidad mediante extrusión e inyección y sus propiedades mecánicas y de compostabilidad para aplicaciones sostenibles.

## METODO EXPERIMENTAL

### Materiales

La pectina empleada, procedente de residuos cítricos y presentada en forma de polvo, fue suministrada por Tokyo Chemical Industry Co., Ltd. (Tokio, Japón), con número CAS 9000-69-5. Como plastificantes se utilizaron glicerol, proporcionado por Indagoo, con número CAS 56-81-5, y polivinilpirrolidona (PVP), adquirida a Sigma-Aldrich (Madrid, España) con número CAS 9003-39-8.

En la siguiente tabla se muestran las diferentes formulaciones que se van a procesar.

**Tabla 1**. Porcentaje en peso de los materiales a procesar.

| Muestras | PEC (%) | GLY (%) | PVP (%) |
|---|---|---|---|
| 58PEC_30GLY | 58 | 30 | 12 |
| 58PEC_26GLY | 58 | 26 | 16 |
| 52PEC_36GLY | 52 | 36 | 12 |
| 52PEC_32GLY | 52 | 32 | 16 |

**Procesado de los materiales**

Para la fabricación de las probetas, tanto la pectina como el PVP fueron secados previamente en una estufa modelo Carbolite Eurotherm 2416 CG (Hope Valley, Inglaterra) a 40 °C durante 24 horas. Una vez finalizado el secado, se prepararon las mezclas correspondientes a cada formulación en bandejas de aluminio, homogeneizando los componentes con un utensilio de madera. Cada bandeja contenía un total de 20 g de material, cantidad que variaba en función del número de muestras deseadas. La combinación de diferentes proporciones de pectina, glicerol y PVP permitió evaluar la influencia de cada componente sobre las propiedades finales del biopolímero.

El procesado se realizó mediante una microextrusora de doble husillo co-rotante Xplore MC 15 HT, a una velocidad de 110 rpm y manteniendo una temperatura constante de 130 °C en todas las zonas del equipo. Cada formulación se introdujo en la extrusora y se procesó durante aproximadamente 2 minutos, tiempo necesario para que la pectina comenzara a plastificar y el valor del torque se estabilizara. Alcanzada dicha estabilización, se abrió la boquilla y el material fue transferido a una microinyectora Xplore IM 12. Cabe destacar que el llenado de la pistola se realizó de forma lenta debido a la baja fluidez de las formulaciones. La inyección se llevó a cabo a una presión de 8 bar, con una temperatura de pistola de 130 °C y una temperatura de molde de 30 °C. El molde contaba con dos cavidades para la obtención de probetas normalizadas de tracción (75 × 10 × 2 $mm^3$) e impacto (80 × 10 × 4 $mm^3$).

Finalmente, todas las probetas fueron almacenadas en un desecador para minimizar la absorción de humedad ambiental y caracterizadas mecánicamente una semana después de su fabricación.

**Caracterización**

**Caracterización mecánica:** las propiedades mecánicas de las diferentes formulaciones fueron obtenidas mediante tres ensayos principales: tracción con máquina universal, impacto mediante péndulo Charpy y medición de dureza utilizando un durómetro Shore D. Los datos obtenidos se representarán mediante gráficas con el fin de estudiar la evolución de la tensión máxima, la deformación y el módulo elástico en función de los plastificantes y de la cantidad de pectina. Del mismo modo, el ensayo de impacto permitirá determinar las variaciones en la energía absorbida bajo estas mismas condiciones. Se examinará además la influencia de dichos factores sobre la dureza de las formulaciones procesadas. Con el fin de garantizar la representatividad estadística de los resultados obtenidos, se ensayaron 5 muestras de cada formulación para cada ensayo.

**Ensayo de compostaje:** la compostabilidad de los materiales se evaluó siguiendo la norma UNE-EN ISO 20200:2024, que reproduce en laboratorio un proceso de compostaje controlado. El compost se preparó con un 55% de agua destilada y un 45% de residuo sólido sintético, introduciéndose las muestras en un biorreactor, e incubándose a 58 ºC durante 84 días. Se utilizaron fragmentos de las cabezas de las probetas de tracción, encapsulados en malla para evitar pérdidas durante el proceso. Semanalmente se extraía una muestra de cada material, que se secaba durante 24 horas y se pesaba para calcular el grado de desintegración a partir de la masa inicial y la masa seca final del material. El ensayo de compostabilidad se realizó por triplicado para garantizar la representatividad estadística de los resultados.

## RESULTADOS

### Procesabilidad

Todos los materiales desarrollados pudieron ser procesados mediante extrusión e inyección, confirmando la viabilidad de estas técnicas para la obtención de biopolímeros basados en pectina. Durante la extrusión se monitorizó el torque como indicador del comportamiento reológico, observándose un incremento brusco inicial asociado a la plastificación del sistema, seguido de un descenso progresivo al vaciar la extrusora. Las formulaciones con mayor contenido en pectina presentaron torques más elevados, de hasta 12 Nm, así como mayores dificultades de fluidez, debido a la elevada viscosidad y sensibilidad térmica de la pectina, que tendía a adherirse a las paredes del equipo reduciendo su procesabilidad. Cabe destacar que, aunque se observó plastificación tanto por debajo del 52% como por encima del 58% de pectina, la obtención de probetas mediante inyección resultó muy dificultosa en ambos casos, por lo que las formulaciones finales se situaron dentro de este rango de concentración.

### Propiedades mecánicas

El ensayo de tracción permite determinar el comportamiento del material bajo una carga axial creciente hasta la rotura, proporcionando parámetros clave como el módulo de Young, la resistencia máxima y la deformación a rotura. Las formulaciones con 58% de pectina presentan un comportamiento rígido y resistente, mientras que las de 52% de pectina resultan más flexibles y dúctiles. El módulo elástico y la tensión máxima están fuertemente influenciados por el contenido de pectina, que actúa como fase estructural del sistema, tal como se demuestra en la Tabla 2. Un mayor contenido de glicerol reduce la rigidez y la resistencia al incrementar la movilidad de las cadenas, mientras que el PVP también contribuye a reducir el módulo en ambos grupos de formulaciones. La deformación a rotura, en cambio, se mantiene relativamente constante en todas las formulaciones, entre el 15% y el 17%, sugiriendo que el sistema alcanza un equilibrio estructural independiente de la rigidez inicial.

Comparados con plásticos convencionales, los valores obtenidos son inferiores, lo cual es esperable dada la naturaleza de los biopolímeros. Sin embargo, los resultados son comparables a los reportados para otros biopolímeros plastificados procesados por técnicas similares, como el almidón termoplástico o la zeína termoplástica por inyección, confirmando la viabilidad mecánica de las formulaciones desarrolladas [2, 3]

Respecto al ensayo de impacto Charpy, permite cuantificar la energía absorbida por el material durante la rotura. Los resultados muestran una clara influencia de la composición en la capacidad de absorber energía.

Las formulaciones con 52% de pectina presentan una resiliencia notablemente superior, alcanzando valores de hasta 41 kJ/m$^2$, frente a las formulaciones con 58% de pectina, que muestran valores significativamente más bajos. Este comportamiento indica que la reducción del contenido de pectina y el aumento de la plastificación favorecen la disipación de energía durante el impacto, al permitir una mayor movilidad de las cadenas y mecanismos de deformación plástica localizada. Estos resultados son coherentes con las propiedades obtenidas por tracción, las formulaciones más rígidas y resistentes estáticamente presentan menor capacidad de absorción de impacto, mientras que las formulaciones más flexibles muestran mayor tenacidad, confirmando que la disminución de la rigidez favorece el comportamiento dúctil frente a cargas dinámicas.

**Tabla 2**. Propiedades mecánicas de los biopolímeros de pectina procesados.

| | Tracción | | | Impacto Charpy | Dureza |
|---|---|---|---|---|---|
| **Materiales** | **E (MPa)** | **$\sigma_{max}$ (MPa)** | **$\varepsilon_b$ (%)** | **Resiliencia (kJ/m$^2$)** | **Dureza Shore D** |
| **58PEC_30GLY** | 197 ± 46 | 10,1 ± 1,5 | 17,2 ± 4,2 | 22,7 ± 3,3 | 54,1 ± 1,1 |
| **58PEC_26GLY** | 120 ± 22 | 6,7 ± 0,9 | 17,7 ± 3,7 | 18,2 ± 3,5 | 52,5 ± 1,7 |
| **52PEC_36GLY** | 25,5 ± 17,5 | 1,9 ± 0,8 | 17,0 ± 3,5 | 29,2 ± 3,2 | 25,3 ± 2,8 |
| **52PEC_32GLY** | 10,4 ± 7,0 | 1,8 ± 0,4 | 15,5 ± 3,3 | 41,1 ± 2,2 | 21,6 ± 1,3 |

El ensayo de dureza cuantifica la resistencia del material a la penetración de un indentador, proporcionando una medida indirecta de la rigidez superficial. Los resultados muestran una tendencia clara y coherente con los ensayos anteriores, las formulaciones con 58% de pectina presentan valores de dureza significativamente superiores, mientras que las de 52% de pectina muestran valores cercanos a 20, comportándose como materiales considerablemente más blandos. Este comportamiento refleja que una mayor densidad de interacciones moleculares, asociada a un mayor contenido de pectina, incrementa la resistencia superficial, mientras que el aumento del contenido en plastificante y la reducción de la fracción estructural favorecen la deformación local.

## Compostabilidad

La compostabilidad de los materiales se evaluó mediante el seguimiento de la pérdida de masa a lo largo del tiempo. Desde la primera semana, todas las formulaciones muestran una desintegración significativa, con pérdidas de masa de entre el 30% y el 50%, siendo ligeramente superiores en las formulaciones con mayor contenido en glicerol debido a su mayor afinidad por el agua. El tiempo necesario para alcanzar el 50% de pérdida de masa se sitúa en torno a la primera semana para formulaciones que mayor contenido en glicerol contenían (52PEC_32GLY, 52PEC_36GLY), mientras que para las dos otras formulaciones, con mayor contenido en pectina (58PEC_30GLY, 58PEC_26GLY), este umbral se alcanza entre la primera y la segunda semana. En la segunda semana se alcanzan pérdidas superiores al 80% en todas las formulacines, siendo especialmente rápida la degradación de las muestras del material 52PEC_36GLY, que supera el 95% en ese punto. En la cuarta semana todas las formulaciones alcanzan el 100% de pérdida de peso, confirmando la degradación completa de los materiales.

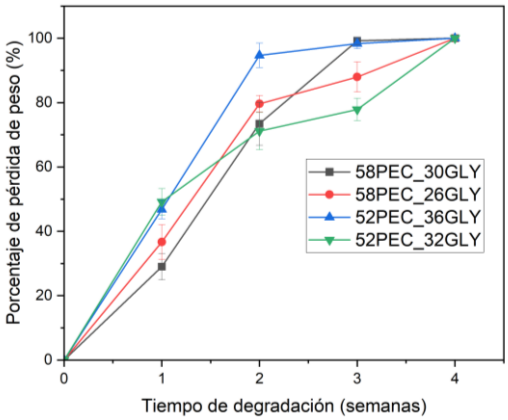



**Figura 1**. Evolución del porcentaje de pérdida de peso en función del tiempo.

## CONCLUSIONES

El siguiente trabajo demuestra, por primera vez, la viabilidad de procesar biopolímeros basados en pectina mediante extrusión e inyección. La incorporación de glicerol y PVP como plastificantes permitió superar la limitada termoprocesabilidad inherente a la pectina, obteniéndose materiales homogéneos y estables dentro del rango de 52-58% de contenido en pectina.

Las propiedades mecánicas de los materiales desarrollados son ajustables en función de la composición. Las formulaciones con mayor contenido en pectina presentan un comportamiento más rígido y resistente, mientras que las más plastificadas resultan más flexibles y tenaces. En conjunto, los valores obtenidos son comparables a los descritos en la bibliografía para otros bioplásticos obtenidos a partir de residuos agroalimentarios. Finalmente, el ensayo de compostabilidad confirma la elevada biodegradabilidad de todas las formulaciones, alcanzando una desintegración completa en torno a los 28 días, lo que las sitúa dentro de la categoría de bioplásticos de alta degradabilidad.

En definitiva, los resultados obtenidos validan el potencial de la pectina como alternativa sostenible y procesable industrialmente a los plásticos convencionales, abriendo la puerta a futuras investigaciones orientadas a la optimización de formulaciones y al desarrollo de nuevos productos biodegradables.

## REFERENCIAS

[1] F. Bauer *et al.*, "Plastics and climate change—Breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways," *One Earth,* vol. 5, no. 4, pp. 361-376, 2022/04/15/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.007.

[2] N. Khanoonkon, K. M. Dang, and R. Yoksan, "Injection-molded thermoplastic cassava starch modified with single and mixed polyol plasticizers," *International Journal of Biological Macromolecules,* vol. 280, p. 136335, 2024/11/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136335.

[3] S. Rojas-Lema, J. Gomez-Caturla, R. Balart, M. P. Arrieta, and D. Garcia-Sanoguera, "Development and characterization of thermoplastic zein biopolymers plasticized with glycerol suitable for injection molding," *Industrial Crops and Products,* vol. 218, p. 119035, 2024/10/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119035.

# Diseño inverso de andamios TPMS de hidroxiapatita para ingeniería tisular mediante aprendizaje automático

**Sánchez-Alvarracín, Carlos[1,2]*, Ferrándiz Bou, Santiago[1], Cobos Maldonado, Christian[1,3]**

1) *Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoy, Alicante, España*
2) *Grupo de Evaluación de Riesgos Ambientales en Sistemas de Producción y Servicios (RISKEN), Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Av. Loja, Cuenca, Ecuador*
3) *Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y procesos de transformación (GIMAT), Universidad Politécnica Salesiana, Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Ecuador*

**E-mail: cmsanalv@doctor.upv.es*

## RESUMEN

La regeneración de defectos oseos críticos es uno de los desafíos clínicos más relevantes de la medicina regenerativa actual. Los andamios de hidroxiapatita (HA) con geometría de superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) han surgido como una gran alternativa al injerto óseo convencional, combinando propiedades mecánicas ajustables, porosidad interconectada y excelente biocompatibilidad. Elegir la geometría adecuada del andamio para una resistencia concreta sigue siendo un proceso de prueba y error que consume tiempo y recursos.

El presente trabajo describe un sistema computacional para el diseño inverso de andamios TPMS-HA. A partir de la resistencia a compresión del sitio de implantación deseado, el sistema predice automáticamente el tipo de estructura TPMS, la porosidad, el tamaño de poro, el espesor de pared, el porcentaje de HA y el método de fabricación recomendado. Además, se incluye un generador de ecuaciones para nuevas geometrías TPMS basadas en series de Fourier tridimensionales para exportar a nTop y obtener archivos STL de andamios sólidos listos para impresión por fotopolimerización estereolitografía (SLA) y procesamiento digital de luz (DLP).

Los modelos de aprendizaje automático (ML) se entrenaron con muestras experimentales reales extraídas de publicaciones del periodo 2019-2025, lo que diferencia este trabajo de aproximaciones anteriores que utilizaban datos extraídos de simulación numérica.

**Palabras clave**: andamios TPMS; hidroxiapatita (HA); aprendizaje automático (ML); diseño inverso; ingeniería tisular; impresión 3D; series de Fourier; DLP/SLA.

## INTRODUCCION

La necesidad clínica de implantes oseos personalizados crece con el envejecimiento de la población y el incremento de defectos oseos críticos debidos a traumatismos, enfermedad oncológica y patología degenerativa. Se estima que se realizan anualmente más de 2,2 millones de procedimientos de injerto óseo en el mundo, siendo la segunda cirugía más frecuente del sistema musculoesquelético [1]. El patrón de referencia sigue siendo el injerto autólogo, es decir, tomar hueso del propio paciente, normalmente de la cresta iliaca, y colocarlo donde hace falta. Este procedimiento funciona bien, pero implica abrir una segunda zona, el paciente sufre más, la disponibilidad de tejido es

limitada y la recuperación se alarga [2]. Desde hace al menos dos décadas existe un campo dedicado a desarrollar materiales sintéticos que hacen el mismo trabajo. Entre los materiales sintéticos, la hidroxiapatita (HA) es el más estudiado, por su composición química que es casi idéntica a la fase mineral del hueso real, se integra bien con el tejido circundante y no genera respuesta inflamatoria [3]. La HA densa aguanta mucha carga pero el hueso no crece dentro de ella; necesita poros suficientemente grandes y conectados entre sí para que las células y los vasos puedan colonizar el implante.

Aquí es donde entran las superficies TPMS. Son geometrías matemáticas donde, en cada punto de su superficie la curvatura media es cero, lo que las hace extremadamente eficientes desde el punto de vista estructural. En un andamio, el resultado es una red tridimensional con poros interconectados, paredes de espesor uniforme y una suave distribución de tensiones [4]. Los seis tipos más estudiados, Gyroid, Schwartz-P, Diamond, IWP, Neovius y Lidinoid, presentan propiedades mecánicas distintas que los hacen adecuados para diferentes sitios físicos. La fabricación aditiva por fotopolimerización (DLP/SLA) permite reproducir geometrías complejas con precisión micrométrica, siendo la tecnología de referencia actual para andamios cerámicos de alta confianza [5]. Sin embargo, la selección de la geometría óptima para un requisito mecánico específico es un proceso empírico sin herramientas de apoyo sistemático [6].

Este trabajo propone un modelo ML inverso entrenado con datos experimentales reales que automatiza ese proceso de selección y generación del andamio.

## OBJETIVOS

El objetivo principal es desarrollar un pipeline computacional completo que, a partir de la resistencia a compresión objetivo, proporcione los parámetros de diseño del andamio y calcule las ecuaciones implícitas de las geometrías TPMS optimas, incluyendo estructuras nuevas generadas por series de Fourier 3D y se generen sólidos volumétricos que se exporten como archivos STL listos para impresión 3D.

Este artículo se centra en la revisión bibliográfica para respaldar un dataset con datos reales y por lo tanto los resultados computacionales.

## REVISION BIBLIOGRAFICA

### Propiedades mecánicas del hueso de referencia

El hueso trabecular presenta resistencias a compresión de 0,1 a 30 MPa y módulos elásticos de 75 ± 32 MPa y 430 ± 130 MPa, con porosidades del 40 al 82% según el sitio anatómico. La vertebra lumbar se sitúa en el rango 0,1-5 MPa; el trocánter y la tibia proximal, entre 2 y 15 MPa; y la zona mixta de metáfisis, entre 12 y 33 MPa [7]. Estas cifras son las cotas de diseño reales para que los materiales de sustitución funcionen sin fracturarse ni transmitir cargas inadecuadas al tejido circundante. Estos rangos constituyen la condición de contorno clínica fundamental para el diseño de andamios y definen el espacio de trabajo del modelo ML.

### Andamios TPMS-HA: estado del arte experimental

En los últimos años ha crecido considerablemente el número de trabajos que fabrican andamios TPMS de HA por DLP o SLA. La caracterización mecánica mediante técnicas avanzadas de impresión 3D como estereolitografía permite optimizar parámetros

estructurales para aplicaciones tisulares específicas [8]. Algunos resultados merecen mención especial porque definen el estado del arte experimental que apoya este trabajo.

Guo et al. publicaron en 2025 un estudio exhaustivo con seis tipos de TPMS fabricados por DLP con adición de biovidrio [5]. Sus datos son muy valiosos porque todos los tipos se fabricaron con el mismo proceso y se ensayaron en las mismas condiciones, lo que hace comparables los resultados. El Schwartz-P fue el más resistente, con valores de hasta 33,5 MPa para porosidades del 40%. El Gyroid, que es el tipo más estudiado en la literatura, mostro valores intermedios coherentes con lo reportado en otros trabajos. Esta jerarquía, Schwartz-P > IWP > Diamond > Gyroid > Neovius > Lidinoid en términos de resistencia a igual porosidad, es la que el modelo ML reproduce de forma estadística. Esto forma parte del marco experimental en el que se sitúan las predicciones del sistema aquí presentado.

### Aprendizaje automático para el diseño de andamios

La idea de usar ML para diseñar andamios no es nueva, pero la mayoría de los trabajos tienen una limitación importante: los datos con los que entrenan sus modelos son generados por simulación de elementos finitos. Ibrahimi et al. [6] construyeron un dataset de más de 1.000 andamios TPMS generados por FEM y entrenaron modelos ML con $R^2$ > 0,89. Su principal limitación es el origen sintético de los datos, que no presentan una variabilidad real del proceso de fabricación. Liu et al. [9] propusieron optimización Bayesiana para andamios cerámicos con gradiente funcional validados por micro-CT. Al-Kharusi et al. [10] concluyeron que la integración de ML y diseño de experimentos permite reducir las iteraciones experimentales necesarias.

Ninguno de estos trabajos aborda el diseño inverso desde una entrada clínica única hasta el archivo STL, ni emplea datos exclusivamente experimentales.

## METODOLOGIA

### Construcción del dataset experimental

Se realizó una búsqueda sistemática en ScienceDirect, PubMed y ResearchGate, abarcando publicaciones del periodo 2019-2025. El criterio de inclusión fue: andamios con base de HA, tipo TPMS, resistencia a compresión medida por ensayo físico real y fabricación por DLP/SLA. Se excluyeron los datasets puramente numéricos, los andamios metálicos o poliméricos y los registros con datos insuficientes.

Se identificaron 28 fuentes primarias que aportaron 88 registros individuales con 10 variables cada uno. Las variables para cada muestra incluyen el tipo de TPMS, porosidad, tamaño de poro, espesor de pared, contenido de HA, material aditivo, método de fabricación, temperatura de sinterización, resistencia a compresión y módulo de elasticidad. La Tabla 1. muestra un resumen del dataset obtenido.

**Tabla 1.** Distribución del dataset por tipo de estructura TPMS.

| Tipo TPMS | N muestras | $\sigma_c\ min$ (MPa) | $\sigma_c\ max$ (MPa) | Método impresión |
|---|---|---|---|---|
| Gyroid | 47 | 0.63 | 31.6 | DLP/SLA |
| Schwartz-P | 23 | 1.3 | 33.52 | DLP |
| Diamond | 9 | 2.5 | 129 | DLP/SLA |
| IWP | 4 | 3.1 | 35.9 | DLP |
| Lidinoid | 4 | 3.5 | 20 | SLA |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Neovius | 1 | 3.8 | 3.8 | DLP/SLA |

### El modelo de predicción

El diseño inverso se planteó como un problema de regresión y clasificación multi-salida, dado el valor de σ_c, se predice simultáneamente el tipo de TPMS, porosidad, tamaño de poro, espesor de pared, contenido de HA y el método de fabricación. En lugar de entrenar un único modelo multi-salida, se optó por un modelo independiente por variable de salida, lo que permite elegir el algoritmo más adecuado para cada distribución.

Se compararon tres algoritmos para las salidas numéricas: Random Forest, Gradient Boosted Trees y Soporte Vector Machine con kernel RBF. Para las salidas categóricas se usaron clasificadores Random Forest. La variable de entrada se normalizó por z-score. El pipeline esta implementado en Matlab R2025b.

El tamaño del dataset (88 muestras) es una limitación inherente al carácter experimental de este estudio, ya que los datos de ensayos físicos reales son escasos y costosos, lo que explica el uso de datos sintéticos en trabajos previos. Para mitigar el riesgo de sobreajuste se empleó K-Fold Cross-Validation con k=5 pliegues. Los resultados completos se reportarán en una publicación extendida actualmente en preparación.

### Generación de geometrías Fourier

Además de las seis geometrías TPMS enumeradas en la literatura, el sistema genera dos estructuras adicionales mediante series de Fourier tridimensionales. Estas representan el campo implícito como una combinación lineal de ocho funciones base, cada una correspondiente a uno de los tipos TPMS, cuyos coeficientes se determinan de dos formas: Fourier-opt, es una búsqueda entre combinaciones predefinidas que cubren el espacio de diseño de forma sistemática y Fourier-reg una regresión lineal ponderada sobre los registros del dataset con resistencia próxima a la objetivo.

Ambas estructuras se validan matemáticamente verificando que la curvatura media H es aproximadamente cero en puntos muestreados de la isosuperficie, condición necesaria para que sean TPMS auténticas. Al terminar la predicción, el código genera las ecuaciones implícitas exactas de cada estructura y un archivo STL, listos para ingresar en el software nTop o ANSYS para cualquier análisis posterior o impresión.

### Integración con nTop

Para geometrías con paredes delgadas o porosidades altas, el método de generación de mallas en Matlab puede introducir pequeños errores geométricos que el software de impresión detecta como defectos y rechaza. En nTop la ecuación TPMS se introduce como campo matemático, se convierte en cuerpo sólido con el espesor predicho por el modelo, y la malla se genera sin defectos con resolución de 0,05 mm.

## RESULTADOS

La Tabla 2 resume el rendimiento del modelo. Los valores corresponden al conjunto de prueba. Los valores son orientativos; los resultados definitivos con validación cruzada completa se incluirán en una publicación extendida.

**Tabla 2.** Valores orientativos del rendimiento del modelo.

| Variable | Algoritmo | $R^2$ orientativo |
|---|---|---|
| Porosidad (%) | Random Forest | 0,55 – 0,75 |

| | | |
|---|---|---|
| Tamaño de poro (µm) | Random Forest | 0,40 – 0,60 |
| Espesor de pared (mm) | Gradient Boosting | 0,45 – 0,65 |
| % HA | SVR-RBF | 0,30 – 0,50 |
| Tipo TPMS | RF Clasificador | 65 – 75% exactitud |
| Método fabricación | RF Clasificador | 70 – 80% exactitud |

Los rangos son inferiores al $R^2$=0,89 de Ibrahimi et al. [6], resultado esperado dado que su trabajo usa datos sintéticos de elementos finitos con variabilidad controlada, mientras que el presente modelo incorpora la variabilidad real del proceso, lo que reduce el $R^2$ pero incrementa la transferibilidad clínica.

En la Figura 1 se muestran las estructuras generadas: la TPMS Diamond conocida y las dos data-driven (Fourier-opt y Fourier-reg) para σ_c = 25 MPa. Además, la consola de Matlab muestra sus fichas técnicas con: ecuación implícita, valor del nivel *t*, número de onda *k*, tamaño de celda, porosidad real calibrada, espesor de pared y parámetros del material. Es decir, toda la información que se necesita para imprimir el andamio.

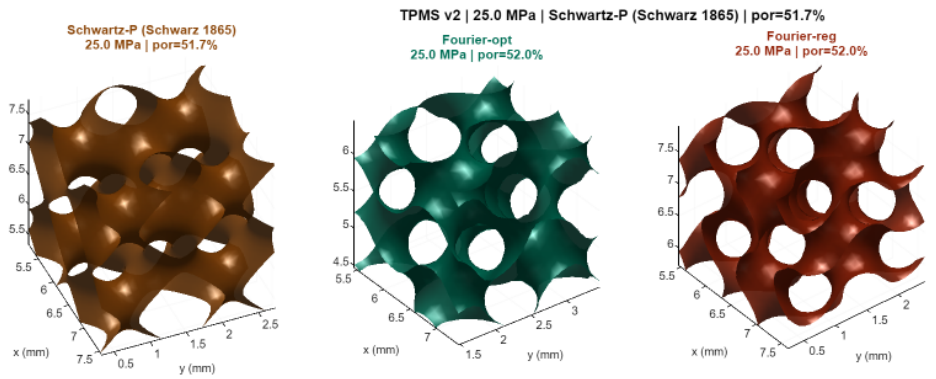



**Figura 1.** TPMS Diamond (conocida), Fourier-opt y Fourier-reg (nuevas) para σ_c = 25 MPa

## Las nuevas estructuras Fourier

Las dos geometrías generadas desde el data-driven son estructuralmente distintas entre sí y distintas de los seis tipos catalogados. Para el rango bajo de σ_c el método Fourier-opt tiende a geometrías con fuerte componente Gyroid, mientras que para resistencias superiores aparece progresivamente la componente IWP. El método Fourier-reg produce combinaciones más distribuidas, con contribuciones de Gyroid y Diamond principalmente, que reflejan estadísticamente los andamios del dataset que mejor predicen la resistencia objetivo.

La Figura 2 muestra la comparación de cortes 2D de las tres estructuras y el histograma de coeficientes Fourier de cada geometría nueva. Los coeficientes de estas estructuras los determina el dataset experimental.

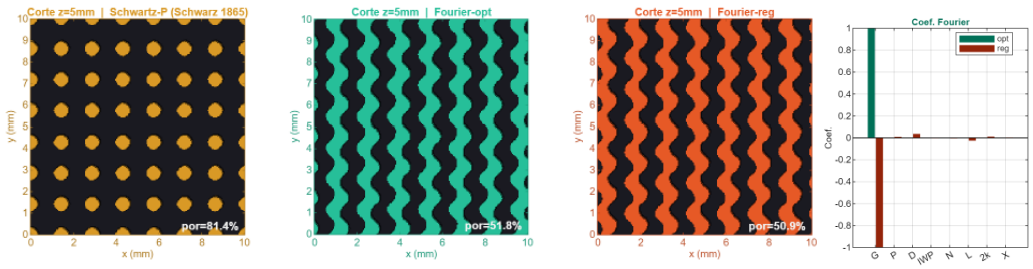



**Figura 2.** Cortes 2D en z = 5 mm de las tres estructuras para σ_c = 25 MPa y panel de coeficientes Fourier de las dos estructuras data-driven.

Al finalizar el pipeline en Matlab se genera en la consola y listas para copiar en nTop, las ecuaciones exactas, el valor de k calibrado, el nivel t de la isosuperficie y los coeficientes a_i de cada estructura Fourier. Con esto se generan sólidos volumétricos exportables como STL de alta calidad. Este flujo resuelve el problema de las paredes no solidas que presenta la triangulación directa en Matlab.

## CONCLUSIONES

Se realizó un pipeline computacional para el diseño inverso de andamios TPMS-HA que, a partir de una única entrada clínica (resistencia a compresión en MPa), predice automáticamente los parámetros de diseño, genera tres geometrías tridimensionales (TPMS conocida + 2 Fourier), exporta los archivos STL y proporciona las ecuaciones exactas para cualquier análisis en ANSYS y nTop.

Lo que lo distingue de trabajos anteriores es que los modelos se entrenaron con datos experimentales físicos reales, no con simulaciones numéricas, lo que le da una evidencia clínica que los enfoques basados en FEM no tienen.

Las aportaciones originales del trabajo son: (1) un dataset experimental de andamios TPMS-HA con 88 muestras de diversas fuentes y un rango de σ_c 0,63-129 MPa; (2) un pipeline de diseño inverso σ_c a STL basado en datos físicos reales; y (3) el generador de nuevas geometrías TPMS mediante series de Fourier 3D, matemáticamente validas como superficies de curvatura media nula.

La validación experimental mediante fabricación física, ensayos mecánicos, caracterización microestructural y evaluación de biocompatibilidad constituye la siguiente fase de la investigación. Esto permitirán cuantificar el error real del modelo bajo condiciones de fabricación reales y determinar la confiabilidad de las predicciones.

## REFERENCIAS

[1] Zhang, J. et al. (2025). “Research Progress of Bone Grafting: A Comprehensive Review”. *International Journal of Nanomedicine*, v. 20, p.p. 4729-4757. https://doi.org/10.2147/IJN.S510524.

[2] Kubiak-Mihkelsoo, Z. et al. (2025). “Ionic Doping of Hydroxyapatite for Bone Regeneration: Advances in Structure and Properties over Two Decades — A Narrative Review”. *Applied Sciences*, v. 15, p.p. 1108. https://doi.org/10.3390/app15031108

[3] Liu, C. et al. (2024). “Exploring the potential of hydroxyapatite-based materials in biomedicine: A comprehensive review”. *Materials Science and Engineering R Reports*, v. 161, p.p. 100870. https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100870

[4] Al-Ketan, O.; Abu Al-Rub, R.K. (2019). "Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices". *Advanced Engineering Materials*, v. 21, p.p. 1900524. https://doi.org/10.1002/adem.201900524

[5] Guo, W. et al. (2025). "Biomimetic TPMS porous hydroxyapatite bone scaffolds doped with bioactive glass". *Composites Part A*, v. 193, p.p. 108870. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108870

[6] Ibrahimi, S. et al. (2024). "Machine learning approaches for the design of biomechanically compatible bone tissue engineering scaffolds". *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*., v. 423, p.p. 116842. https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.116842

[7] Öhman-Mägi, C. et al. (2021). "Density and mechanical properties of vertebral trabecular bone: a review". *JOR Spine*, v. 4, p.p. e1176, https://doi.org/10.1002/jsp2.1176

# Transformando la experiencia de usuario en la app de una empresa de moda: un enfoque desde la salud mental y las imágenes de moda

**Sabater-Revert, Paula, Pedraza León, Melanie Esther, Henao Galindo, Shirley Andrea, Mengual-Recuerda, Ana**

*(1) Universitat Politècnica de València (España), psabrev@upv.es*
*(2) Universitat Politècnica de València (España), melpedraza30@gmail.com*
*(3) Universidad Sergio Arboleda (Colombia), shirley.henao02@usa.edu.es*
*(4) Universitat Politècnica de València (Spain),* anmenre1@upv.es

## RESUMEN

El fast fashion se ha convertido en un fenómeno de consumo masivo que transforma hábitos de compra y, simultáneamente, influye en la relación emocional de las personas con su cuerpo, su autoimagen y su bienestar psicológico. Este artículo sintetiza un Trabajo Final de Máster centrado en la experiencia de usuario (UX) de la aplicación móvil de Zara y su potencial impacto sobre estados emocionales vinculados a la salud mental, así como su interacción con publicidad, redes sociales y comparación social. Se emplea triangulación metodológica (cuantitativa, cualitativa y neuromarketing) mediante entrevistas, encuestas y técnicas biométricas como eye tracking y mapas de calor. Los resultados sugieren que la atención visual se concentra en elementos estéticos (modelos y producto), mientras que textos e información secundaria reciben menor fijación. La UX actual se percibe funcional pero emocionalmente neutra, lo cual limita la conexión afectiva. Las encuestas muestran presencia de ansiedad y emociones asociadas a comparación social y frustración por discrepancias entre expectativas digitales y realidad física. Se propone incorporar una sección de recomendaciones basada en estado emocional para fomentar una interacción más humana y adaptativa. Se concluye que el diseño digital y la representación visual en fast fashion pueden influir indirectamente en bienestar emocional y conducta de consumo, recomendando enfoques de diseño responsables orientados a salud mental y UX afectiva.

**Palabras clave:** Neuromarketing, fast fashion, Zara, UX/UI, eye tracking, mapas de calor, salud mental, comparación social.

## INTRODUCCIÓN

La industria de la moda rápida se ha consolidado como uno de los sectores de mayor dinamismo comercial, caracterizado por ciclos de diseño y producción acelerados, renovación constante de colecciones [1] y un fuerte apoyo en la comunicación digital y publicitaria [2, 3]. En este contexto, el consumidor joven se expone a estímulos continuos que pueden intensificar procesos de comparación social, deseo de pertenencia y búsqueda de gratificación inmediata, impactando directamente en su bienestar psicológico [4, 5]. La marca Zara, como referente global del fast fashion, ofrece un caso idóneo para analizar cómo el diseño de experiencias visuales [6] y mensajes publicitarios puede activar emociones y dirigir la atención hacia determinados elementos, elevando la percepción de la marca y sus productos [7].

A nivel académico, el interés por estudiar el fast fashion se ha incrementado debido al impacto ambiental, laboral y social asociado a sus modelos productivos. Paralelamente, desde el punto de vista del comportamiento del consumidor, se reconoce la presencia de disonancias cognitivas: los consumidores pueden declarar preocupación por la sostenibilidad, pero continuar comprando impulsivamente motivados por el precio, la novedad o la presión social. Estas tensiones, y la forma en la que las prendas influyen en el estado emocional [8, 9], convierten el análisis no consciente en una vía relevante para comprender la conducta real.

El neuromarketing y las técnicas biométricas permiten ampliar el análisis más allá de las respuestas declarativas. Herramientas como el eye tracking ofrecen métricas objetivas de atención visual —fijaciones, recorridos, mapas de calor— para identificar patrones de interés y procesamiento de los estímulos [10]. Asimismo, medidas psicofisiológicas pueden aportar indicadores de activación o carga emocional. Integrar estas fuentes con instrumentos cualitativos y cuantitativos posibilita un enfoque más robusto y coherente con estándares de investigación en ciencias sociales aplicadas.

## OBJETIVOS

Objetivo general: analizar la relación entre estímulos de fast fashion (caso Zara) y la respuesta emocional y atencional en consumidores jóvenes.

Objetivos específicos: (1) identificar qué elementos visuales de anuncios y entornos digitales captan mayor atención; (2) evaluar variaciones en la activación emocional ante estímulos promocionales y de sostenibilidad; (3) comparar la respuesta no consciente con las valoraciones declarativas; y (4) proponer recomendaciones de comunicación responsable

## RESULTADOS

Esta sección sintetiza los hallazgos principales del estudio a partir de la triangulación entre métricas biométricas (eye tracking y respuesta fisiológica) y resultados declarativos (cuestionarios posteriores al ensayo). El objetivo fue identificar qué elementos captan la atención, qué estímulos elevan la activación emocional y cómo se relaciona esto con la percepción de marca y el estado de ánimo.

### Atención visual (eye tracking).

Los mapas de calor y las áreas de interés (AOI) evidencian que, en la experiencia digital vinculada a Zara, la atención se concentra prioritariamente en (a) el producto, (b) el precio y (c) elementos de navegación asociados a compra rápida. Cuando se introducen mensajes o herramientas orientadas al bienestar (preguntas sobre estado de ánimo, recomendaciones o avisos), éstos captan atención solo si están jerarquizados visualmente (posición central, contraste o iconografía clara). En caso contrario, se perciben como contenido secundario.

**Respuesta emocional (GSR) y activación.**

Los registros de activación muestran incrementos ante estímulos promocionales y ante interacciones que sugieren urgencia (novedad, disponibilidad limitada, compra en pocos pasos). En cambio, las intervenciones sobre salud mental generan una activación más moderada pero sostenida, compatible con un procesamiento más reflexivo (lectura de mensajes, evaluación del contenido y comparación con la experiencia de uso habitual).

**Resultados declarativos (cuestionarios).**

Tras el ensayo, la mayoría de participantes reportó recordar con más facilidad elementos ligados a la acción (herramientas de compra, navegación, selección de prendas) que los mensajes de apoyo emocional. Sin embargo, cuando se les preguntó por su estado de ánimo y por la presencia de preguntas/recomendaciones durante la experiencia, se observó una valoración positiva: los participantes indicaron que este tipo de intervenciones puede aportar sensación de acompañamiento y reducir ansiedad asociada a la comparación social en redes.

**Síntesis integrada.**

En conjunto, los datos sugieren una brecha entre atención inmediata (dirigida a producto/precio/acción) y evaluación posterior (donde los mensajes de bienestar y sostenibilidad influyen en la percepción global). Esto refuerza la necesidad de integrar los elementos responsables en posiciones de alta visibilidad para que no queden relegados a un segundo plano.

Activación emocional: los registros psicofisiológicos indicaron picos de activación ante estímulos promocionales, coherentes con respuestas de excitación y anticipación. En estímulos con mensajes éticos o de impacto ambiental, la activación fue más moderada, pero se observó un patrón consistente con procesamiento reflexivo (mayor tiempo de lectura cuando el mensaje era claro y estaba centralizado).

Instrumentos declarativos: en los cuestionarios, los participantes reportaron mayor valoración de transparencia y sostenibilidad cuando el mensaje se percibía como concreto (datos, compromisos verificables) y no como un eslogan genérico. La intención de compra se incrementó ante estímulos atractivos y de tendencia, pero la intención de compra responsable mostró mejora cuando se integraron elementos de sostenibilidad de forma visible.

Triangulación: se detectaron discrepancias entre lo declarado y lo observado: participantes que declaraban alta preocupación por sostenibilidad, en ocasiones dirigían su atención mayoritaria a precio y novedad. Este patrón es compatible con disonancia cognitiva y con la influencia de heurísticos en decisiones rápidas.




**Figura 1**. Pantalla de inicio y principal en la app de Zara. Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación confirman que la industria de la moda rápida capitaliza con éxito estímulos diseñados para activar la recompensa inmediata en el consumidor, tales como la novedad, la tendencia y la urgencia. Estos componentes capturan de forma predominante la atención visual y se asocian con una mayor activación emocional en comparación con los mensajes de la sostenibilidad, aportando datos clave para entender la respuesta del usuario. Sin embargo, la sostenibilidad opera como un potente modulador cognitivo; cuando se integra de manera prominente y visualmente jerarquizada en las áreas de interés principales (AOI), mejora significativamente la evaluación y la intención de compra responsable del usuario.

Asimismo, la triangulación metodológica permitió constatar la presencia de disonancias cognitivas, manifestadas en las marcadas discrepancias existentes entre la preocupación ecológica declarada en los autoinformes y el procesamiento atencional y fisiológico real registrado de forma no consciente por las biometrías.

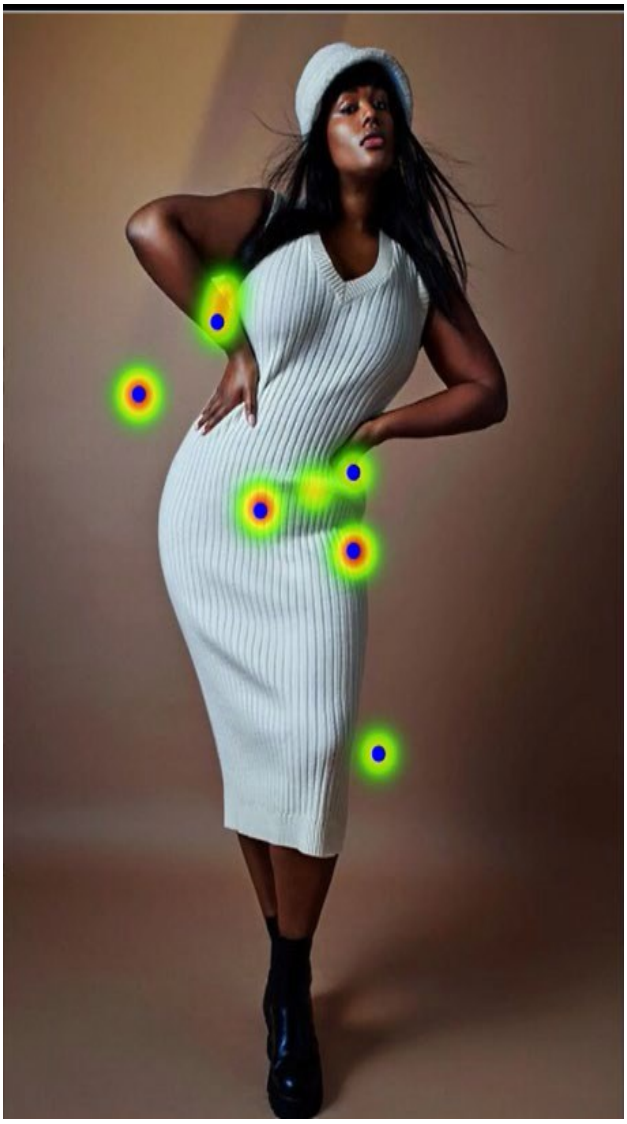


**Figura 2**. Heatmap en imagen de modelo: fijaciones en rostro y zonas corporales centrales. Fuente: elaboración propia.

Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos demuestran que las marcas del sector pueden diseñar estrategias de comunicación responsable sin sacrificar su eficacia comercial, siempre que integren las señales éticas en la arquitectura visual principal de sus plataformas. Para mitigar la disonancia cognitiva y evitar percepciones asociadas al greenwashing, se recomienda diseñar interfaces donde los mensajes sostenibles se ubiquen cerca del producto, emplear iconografía reconocible acompañada de evidencia clara y verificable (como certificaciones o procedencia de materiales), reducir la presión de urgencia temporal al comunicar propuestas de responsabilidad social y evaluar iterativamente las campañas mediante técnicas biométricas para optimizar la claridad comunicativa general.

Finalmente, se reconocen como limitaciones metodológicas del estudio el tamaño muestral acotado, el alcance temporal y la dependencia de estímulos específicos, lo que señala la necesidad de una replicación en el futuro. Como líneas de desarrollo científico, se propone ampliar la muestra de participantes, realizar análisis comparativos entre diferentes marcas del sector de la fast fashion, incorporar métricas de carácter

longitudinal para evaluar el impacto sostenido en el tiempo y analizar la efectividad de narrativas educativas orientadas a la transformación real de los hábitos de consumo del público objetivo.

## REFERENCIAS

[1] Rodríguez, O. RFID: la tecnología que permite a Zara saber dónde está cada una de sus prendas. https://www.elindependiente.com/economia/2020/07/04/rfid-la-tecnologia-que-permite-a-zara-saber-donde-esta-cada-una-de-sus-prendas/

[2] Lluch, Jonathan. Estrategia de marketing y publicidad de Zara. https://jonathanlluch.com/blog/estrategia-marketing-y-publicidad-zara/

[3] Eslogan Magazine. La estrategia de marketing y publicidad de Zara. https://www.esloganmagazine.com/marketing-y-publicidad-de-zara/

[4] Freimuth, A. How fast fashion is impacting your mental health. https://www.wellandgood.com/how-fast-fashion-affects-mental-health/

[5] Girotti. How fast fashion is affecting our mental health. https://girotti.com/blog/how-fast-fashion-is-affecting-our-mental-health

[6] ELLE. La experiencia interactiva del probador de Zara. https://www.elle.com/es/moda/noticias/news/a728505/la-experiencia-interactiva-del-probador-de-zara/

[7] Aracil, M. De modelo de segunda a la liga del lujo: ¿Por qué ahora todas quieren posar para Zara?. https://www.revistavanityfair.es/lujo/moda/articulos/de-modelo-de-segunda-a-la-liga-del-lujo-por-que-ahora-todas-quieren-posar-para-zara/45861

[8] Fernández, L. Por qué la moda que vistes habla de tus emociones. https://www.mujerhoy.com/moda/tendencias/201810/21/como-afecta-moda-emociones-rev-20181019104149.html

[9] Zenu Radio. Cómo influyen las prendas de vestir en nuestra salud mental. https://zenuradio.com/2021/11/como-influyen-las-prendas-de-vestir-en-nuestra-salud-mental/

[10] Tobii Dynavox US. What is eye tracking. https://us.tobiidynavox.com/pages/what-is-eye-tracking

# Investigación computacional de microagujas polimerizadas por dos fotones para estudios de desgaste de biomateriales a microescala

**Sebastiá-Blanes, Georgina[1,2], Pinilla-Cienfuegos, Elena[1,3], Mercadé, Laura[1,2],**

(1) *Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC), Universitat Politècnica de València (UPV), Camí de Vera, s/n, 46022, Valencia, España. M.L: laumermo@ntc.upv.es; P.C.E: epinilla@ntc.upv.es*

(2) *Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, Alicante, España S.B.G: geosebla@fis.upv.es*

(3) *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT), Universitat Politècnica de València (UPV). Camí de Vera, s/n, 46022, Valencia, España.*

## RESUMEN

El análisis del daño interfacial en biomateriales y metamateriales elásticos sometidos a cargas abrasivas requiere metodologías capaces de conectar la respuesta mecánica local con el comportamiento colectivo. En este trabajo se desarrolla un modelo elastodinámico tridimensional basado en el método de elementos finitos, implementado en COMSOL Multiphysics, para estudiar matrices de microagujas polimerizadas por dos fotones como interfaces mecánicas programables en la meso y microescala. La metodología se organiza en tres fases: análisis modal de una microaguja aislada con condiciones absorbentes, estudio de respuesta en frecuencia bajo presión localizada en el vértice y extensión a una red periódica. Además, se realizan barridos paramétricos del módulo de Young y del escalado geométrico, junto con criterios de filtrado basados en el confinamiento del desplazamiento en la región apical. Los resultados muestran modos propios localizados en la punta, una respuesta dinámica dominante bajo presión localizada y la organización de dichos modos en bandas mecánicas dentro de la red periódica. Este modelo proporciona una herramienta computacional para explorar el diseño de microestructuras orientadas al estudio de transferencia de carga, confinamiento elastodinámico y desgaste en biomateriales.

**Palabras clave:** Microagujas 2PP, Modelado FEM, COMSOL Multiphysics, Confinamiento elastodinámico, Floquet-Bloch, Biomateriales.

## INTRODUCCIÓN

El daño interfacial en biomateriales sometidos a contacto mecánico y cargas abrasivas no se origina de forma homogénea, sino mediante la acumulación local de tensiones y microdeformaciones en regiones superficiales y subsuperficiales. En el esmalte dental, los estudios de contacto cíclico con partículas abrasivas han mostrado que la degradación se desarrolla de manera jerárquica, afectando a distintas escalas estructurales y favoreciendo la aparición de defectos locales asociados al desgaste [1]. Estudios recientes han reforzado la necesidad de aproximaciones multiescala más realistas, incorporando partículas abrasivas embebidas en matrices blandas y técnicas como microscopía de fuerza atómica (AFM, Atomic Force Microscopy), microscopía electrónica de barrido (SEM, Scanning Electron Microscopy) y Raman para analizar los mecanismos de microdesgaste [2].

La caracterización mecánica local a escala nanométrica se realiza habitualmente mediante AFM, que permite obtener mapas de propiedades como el módulo de Young, la adhesión o la respuesta viscoelástica [3]. No obstante, estas medidas dependen de la geometría efectiva de la sonda y de los efectos de convolución punta-muestra, que pueden modificar la interpretación del perfil superficial y requieren estrategias específicas de reconstrucción [4]. Además, aunque el AFM proporciona información local de alta resolución, no describe por sí solo cómo múltiples contactos microscópicos interactúan para definir la respuesta de una interfaz extensa. Esta separación entre la caracterización local y el comportamiento macroscópico define la necesidad de enfoques de modelado multiescala, capaces de conectar mecanismos locales de deformación, transferencia de carga y disipación energética con propiedades efectivas del sistema [5]. Dentro de este contexto, los metamateriales mecánicos ofrecen una vía para programar la respuesta elástica mediante el diseño geométrico de la celda unidad, permitiendo controlar la deformación, la rigidez efectiva, la propagación de ondas y la localización de energía mecánica [6].

Las microagujas fabricadas mediante polimerización por dos fotones (*2PP, two-photon polymerization*) constituyen una plataforma especialmente adecuada para explorar esta escala intermedia, ya que esta técnica permite obtener matrices con geometrías controladas, alta precisión espacial y gran versatilidad de diseño [7]. En particular, la posibilidad de modificar parámetros como la altura, la forma, la anchura de base o el espaciado entre microagujas permite plantear arquitecturas mecánicas programables cuyo comportamiento puede ajustarse mediante diseño geométrico, proporcionando una plataforma computacional para estudiar confinamiento elastodinámico, transferencia de carga y fenómenos de desgaste en biomateriales y metamateriales.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un modelo numérico tridimensional basado en el método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method), implementado en COMSOL Multiphysics, para analizar el comportamiento elastodinámico de matrices de microagujas en la micro y mesoescala. Para ello, se estudiará primero la respuesta individual de una microaguja aislada, identificando los modos propios confinados en la región apical y analizando su dependencia con el módulo de Young y la escala geométrica. A continuación, se evaluará su respuesta dinámica ante una presión localizada aplicada en el vértice. Posteriormente, se abordará el comportamiento colectivo de una red periódica bidimensional mediante condiciones de Floquet-Bloch y diagramas de bandas mecánicos, aplicando criterios de confinamiento para seleccionar los modos con mayor localización del desplazamiento en la punta. Finalmente, los parámetros numéricos obtenidos se vincularán al diseño de microagujas fabricables mediante polimerización por dos fotones y a su futura validación experimental mediante AFM.

## MÉTODO

Para predecir el comportamiento elastodinámico de la interfaz, se desarrolló un modelo por elementos finitos en COMSOL Multiphysics. El dominio continuo se discretizó para resolver la ecuación fundamental de movimiento que gobierna la propagación de ondas elásticas en un sólido elástico lineal:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \left[ C_{ijkl}(r) u_k, l \right]_j = 0$$

Donde $\rho$ representa la densidad de masa intrínseca del material, $u_i$ el campo vectorial tridimensional de desplazamientos mecánicos calculados en el espacio cartesiano $(u, v, \mathrm{w})$, $t$ la variable temporal y $C_{ijkl}\ (r)$ es el tensor de rigidez elástica del material. Para conocer las frecuencias propias de la estructura, es decir, los modos naturales en los que la microaguja vibra por sí sola, se asumió una solución armónica en el tiempo, transformando la ecuación elastodinámica en un problema de autovalores. Para caracterizar de forma sistemática tanto la respuesta local como la colectiva, el desarrollo computacional se dividió en tres fases interconectadas.

**Fase I (Análisis Modal Espectral de la Aguja Aislada):** Se caracterizó la respuesta elástica intrínseca de una única microaguja cónica sobre un bloque basal continuo mediante un análisis de autovalores libre de cargas externas. Para evitar reflexiones artificiales en los límites del dominio, se incorporaron capas perfectamente adaptadas (Perfectly Matched Layers, PML) en las caras laterales e inferior del sustrato. A partir del espectro modal, se seleccionaron los modos con mayor localización apical mediante el índice de confinamiento ($\Psi = |u_{cono_{max}}|/|u_{global_{max}}|$) y se aislaron los modos con $\Psi > 0{,}5$. Sobre estos modos se realizaron dos barridos paramétricos: uno constitutivo, modificando el módulo de Young ($E$) entre 20 y 200 MPa, y otro geométrico, aplicando un factor de escala dimensional proporcional de 0.3 a 1.3 respecto a la microaguja original [7,8].

**Fase II (Respuesta Dinámica bajo Presión Localizada):** Manteniendo la geometría aislada y las restricciones basales previas, se acopló un análisis de respuesta en frecuencia dinámico introduciendo una carga por presión uniforme. El barrido de frecuencias de excitación se restringió a la ventana espectral de mayor confinamiento identificada en la Fase I. Esta aproximación idealiza una interacción local tipo punta-muestra, coherente con la caracterización nanomecánica mediante AFM [3,4].

**Fase III (Análisis de Dispersión Fonónica en la Red Periódica 2D):** El estudio local se extendió al comportamiento colectivo mediante la replicación periódica bidimensional de la celda unidad en una red regular. La comunicación elástica entre celdas adyacentes, separadas por un vector de red $a$, se modeló mediante condiciones de contorno de periodicidad de Floquet-Bloch sobre los límites laterales del dominio, donde $a$ es el vector de periodicidad y $k$ es el vector de onda o vector de Bloch [9,10]. En el diagrama de bandas resultante se aplicó un filtro post-procesado con umbrales de confinamiento normalizado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis modal de la microaguja aislada permitió identificar un conjunto reducido de modos propios con elevado confinamiento mecánico como puede verse en la Fig. 1(a). En la Fig. 1(b) se observa que, aunque la estructura presenta numerosos modos dentro del rango de frecuencias estudiado, solo algunos de ellos alcanzan valores altos del índice de confinamiento. A partir de este criterio se seleccionaron los modos I–IV, correspondientes a los estados vibracionales más relevantes desde el punto de vista funcional. Posteriormente, los perfiles de desplazamiento normalizado representados en la Fig. 1(c) permitieron comprobar la distribución espacial de dichos modos seleccionados.

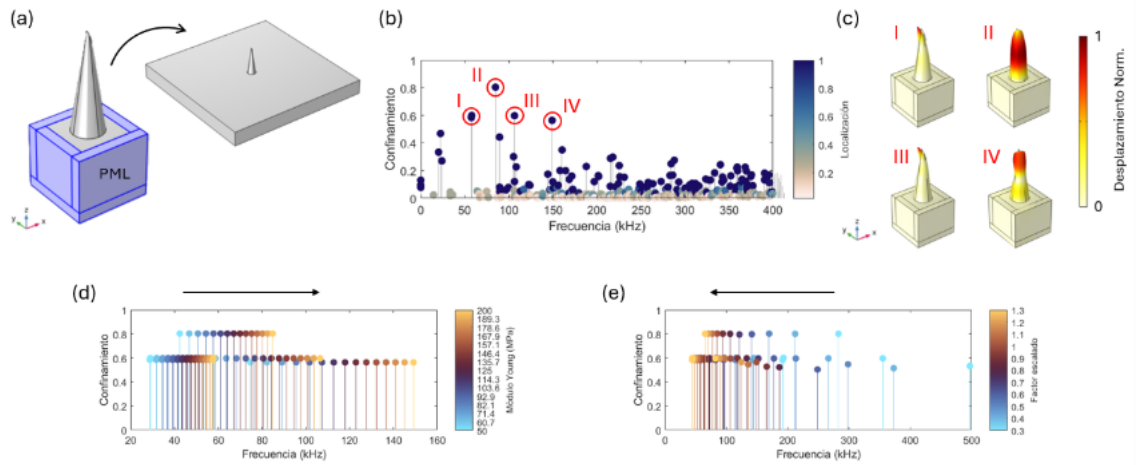



**Figura 1.** (a) Microaguja cónica aislada sobre un sustrato basal con condiciones absorbentes tipo PML. (b) Diagrama de modos propios en función de la frecuencia y del índice de confinamiento, destacando los modos I–IV localizados en la región apical. (c) Perfiles de desplazamiento mecánico normalizado de los modos I–IV. (d) Variación del confinamiento modal en función de la frecuencia al variar el módulo de Young ($E$) del material entre 50 y 200 MPa. (e) Evolución del confinamiento modal en función de la para factores de escala geométrica entre 0,3 y 1,3..

Esta representación confirma que los modos con mayor confinamiento se localizan principalmente en la región apical de la microaguja, evidenciando que la punta actúa como zona preferente de concentración de la deformación mecánica. Por tanto, la microaguja puede comportarse como una región localizada de amplificación mecánica frente a excitaciones externas. Además, los barridos paramétricos muestran que tanto el módulo de Young, Fig.1(d), como el escalado geométrico, Fig. 1(e), modifican la posición espectral de las resonancias. En particular, el aumento de la rigidez desplaza las frecuencias propias hacia valores superiores, mientras que el escalado geométrico modifica la posición espectral de los modos: al aumentar el factor de escala, la microaguja adquiere mayores dimensiones y las frecuencias propias disminuyen.

Una vez identificados los modos confinados de la microaguja aislada, la Fig. 2 evalúa su respuesta frente a una excitación mecánica externa aplicada directamente sobre la punta. Para ello, se aplicó una presión localizada de $P = 10^{-5}$Pa en el vértice superior (región sombreada de la Fig. 2(a)) y se realizó un barrido en frecuencia centrado en la región donde la Fig. 1 mostraba los modos con mayor confinamiento, como puede verse en la Fig. 2(b). El máximo desplazamiento aparece asociado al modo I, indicando que este modo es el que se excita con mayor intensidad bajo presión localizada. Asimismo, la comparación entre el esfuerzo de Von Mises y el desplazamiento mecánico normalizado confirma que la deformación inducida se concentra principalmente en la región apical, representado en la Fig. 2(c). Por tanto, la figura 2 confirma que la punta no solo concentra modos propios en vibración libre, sino que también actúa como zona dominante de respuesta frente a cargas externas. Al extender el análisis a la red periódica bidimensional, la figura 3 muestra que los modos localizados identificados en la microaguja aislada pueden organizarse colectivamente en bandas mecánicas. El diagrama de bandas inicial, Fig. 3(a), evidencia la existencia de múltiples ramas vibracionales en el rango de frecuencias estudiado para el caso de la estructura periódica representada en la Fig. 3(b); sin embargo, no todas presentan el mismo grado de localización ni el mismo interés funcional.

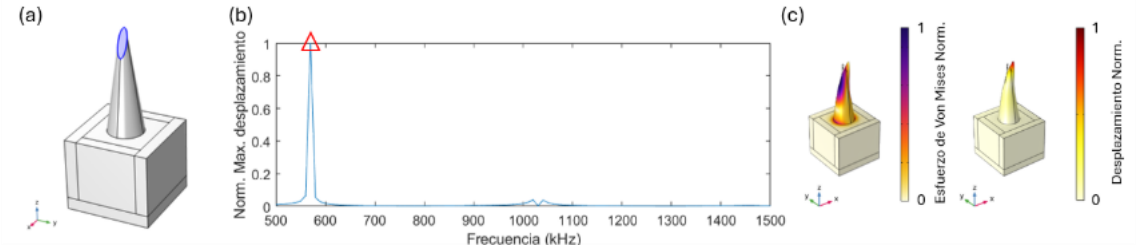



**Figura 2.** (a) Microaguja aislada sometida a una presión localizada en el vértice superior. (b) Respuesta dinámica en frecuencia, representada mediante el desplazamiento máximo normalizado inducido por una presión fija de $P = 10^{-5}$Pa. El barrido se restringe a la región espectral de mayor confinamiento en la Figura 1, mostrando una respuesta dominante asociada al modo I. (c) Distribución espacial del esfuerzo de Von Mises normalizado y del desplazamiento mecánico normalizado para la frecuencia de máxima respuesta.

Al representar el máximo desplazamiento normalizado, Fig. 3(c), y aplicar criterios de filtrado progresivamente más restrictivos, Fig. 3(d), se reducen las ramas dominadas por el sustrato y se destacan aquellos modos en los que la respuesta mecánica se concentra preferentemente en las microagujas. Los perfiles de vibración asociados a los modos I–V confirman que las bandas seleccionadas corresponden a desplazamientos localizados principalmente en la región apical, tal y como puede verse en la Fig. 3(e).

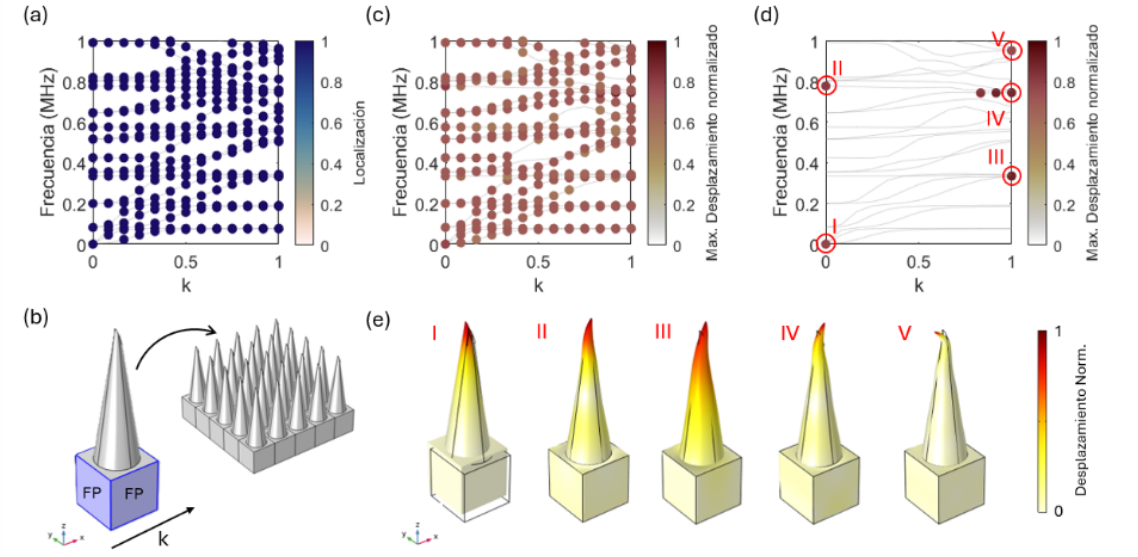



**Figura 3. (a)** Diagrama de bandas mecánico de un sistema bidimensional en función del vector de onda en función de su localización. **(b)** Detalle de la celda unidad con las condiciones de periodicidad señalas. (Inset) Ejemplo del sistema periodo 2D completo. **(c-d)** Diagrama de bandas mecánico en función de su máximo desplazamiento normalizado filtrando valores mayores de 0.5 y 0.75, respectivamente. **(e)** Perfiles de vibración mecánicos de las puntas correspondientes a los modos resaltados en el diagrama **(d).**

## CONCLUSIÓN

En conjunto, los resultados demuestran que las microagujas fabricadas con polimerización de dos fotones pueden concentrar deformación mecánica en la región apical tanto de forma aislada como dentro de una red periódica. El análisis modal identifica los modos localizados en la punta, la respuesta bajo presión confirma su activación selectiva frente a una carga externa y el diagrama de bandas muestra que

estos modos pueden organizarse colectivamente en la matriz. Este modelo FEM constituye, por tanto, una herramienta de diseño para seguir explorando el efecto de otros parámetros, como distintos valores de presión, módulo de Young, escala geométrica, separación entre agujas, condiciones de contacto o geometrías alternativas de microaguja. Así, las microagujas polimerizadas por dos fotones se plantean como una plataforma de micro y mesoescala capaz de conectar la caracterización local tipo AFM con la respuesta mecánica colectiva de biomateriales y metamateriales sometidos a desgaste.

**AGRADECIMIENTOS** Este trabajo ha sido financiado mediante la ayuda n.ºCNS2024-154922, financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE.

## REFERENCIAS

[1] Sánchez-González, E., Pinilla-Cienfuegos, E., Borrero-López, Ó., Rodríguez-Rojas, F., y Guiberteau, F. (2020). *Contact damage of human dental enamel under cyclic axial loading with abrasive particles*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 102, 103512. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103512

[2] Lakhal, Y., Redolat, J., Sánchez-González, E., Constantino, P., Berthaume, M. A., Borrero-López, Ó., y Pinilla-Cienfuegos, E. (2025). *Novel experimental methods to investigate the effects of plant phytoliths on tooth enamel wear*. Journal of the Royal Society Interface, 22, 20250175. https://doi.org/10.1098/rsif.2025.0175

[3] García, R. (2020). Nanomechanical mapping of soft materials with the atomic force microscope: Methods, theory and applications. Chemical Society Reviews, 49, 5850–5884. https://doi.org/10.1039/D0CS00318B

[4] Marques-Moros, F., Forment-Aliaga, A., Pinilla-Cienfuegos, E., y Canet-Ferrer, J. (2020). *Mirror effect in atomic force microscopy profiles enables tip reconstruction*. Scientific Reports, 10, 18911. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75785-0

[5] van der Giessen, E., Schultz, P. A., Bertin, N., Bulatov, V. V., Cai, W., Csányi, G., Foiles, S. M., Geers, M. G. D., González, C., Hütter, M., Kim, W. K., Kochmann, D. M., LLorca, J., Mattsson, A. E., Rottler, J., Shluger, A., Sills, R. B., Steinbach, I., Strachan, A., y Tadmor, E. B. (2020). *Roadmap on multiscale materials modeling*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 28, 043001. https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab7150

[6] Bertoldi, K., Vitelli, V., Christensen, J., y van Hecke, M. (2017). *Flexible mechanical metamaterials*. Nature Reviews Materials, 2, 17066. https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66

[7] Cordeiro, A. S., Tekko, I. A., Jomaa, M. H., Vora, L., McAlister, E., Volpe-Zanutto, F., Nethery, M., Baine, P. T., Mitchell, N., McNeill, D. W., y Donnelly, R. F. (2020). *Two-photon polymerisation 3D printing of microneedle array templates with versatile designs: Application in the development of polymeric drug delivery systems*. Pharmaceutical Research, 37, 174. https://doi.org/10.1007/s11095-020-02887-9

[8] LaFratta, C. N., y Baldacchini, T. (2017). Two-photon polymerization metrology: *Characterization methods of mechanisms and microstructures*. Micromachines, 8(4), 101. https://doi.org/10.3390/mi8040101

[9] Mercadé Morales, L. (2021). *Phonons manipulation in silicon chips using cavity optomechanics* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València, Valencia.

[10] Chin, E. B., Mokhtari, A. A., Srivastava, A., y Sukumar, N. (2021). *Spectral extended finite element method for band structure calculations in phononic crystals*. Journal of Computational Physics, 428, 110044. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.110066

# Modelado multicomponente de la eyección y combustión de gases de venteo por fuga térmica para el diseño de sistemas de transporte de baterías de ion-litio

**Da Silva, José[(1)], Marco-Gimeno, Javier[(1)], Carvallo, César[(1)], Pastor, Jose Vicente[(1)]**

*(1) CMT – Clean Mobility & Thermofluids, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Valencia, España, jadasil1@doctor.upv.es, jamargi2@mot.upv.es, cecargar@mot.upv.es, jpastor@mot.upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo desarrolla una metodología computacional CFD-CHT en Star-CCM+ para diseñar contenedores seguros de transporte de baterías de ion-litio ante el riesgo catastrófico de la fuga térmica. Para ello, se evalúa un contenedor de tres compartimentos con un canal central de evacuación de gases reactivos altamente inflamables y tóxicos. Mediante una matriz de seis simulaciones, se comprueba que el diseño mitiga absolutamente la propagación del TR entre módulos apilados, validando la eficiencia del canal central. No obstante, se identificaron severos gradientes térmicos en las paredes del contenedor adyacentes al evento que implican que el diseño de estos sistemas de confinamiento debe priorizar la selección rigurosa de materiales con alta resistencia física y térmica por encima de la optimización del volumen.

**Palabras clave**: Baterías de Ion litio, Vehículos Eléctricos, Thermal Runaway, Seguridad Vehicular.

## INTRODUCCIÓN

La urgente necesidad de mitigar la dependencia de combustibles fósiles ha posicionado a las baterías de ion-litio (LiB) como líderes en la transición energética y la electromovilidad [1,2]. Aunque su alto rendimiento se debe a que operan cerca de los límites de estabilidad termodinámica de sus materiales, la proyección global de esta tecnología se encuentra limitada por desafíos de seguridad, concretamente relacionados con el fenómeno de la fuga térmica (TR) [3].

El TR es un proceso exotérmico rápido y autosostenido que destruye la celda, acumulando gases y presión hasta romper su estructura, lo que libera un flujo multifásico (gases inflamables, partículas y aerosoles) que puede autoencenderse y generar una llamarada altamente destructiva [4,5]. Este peligro se magnifica drásticamente al transportar módulos a gran escala, donde un fallo en el confinamiento o en el venteo permite la entrada de oxígeno, acelerando la propagación del incendio hacia el vehículo y su carga [4]. Por ello, el diseño actual exige seleccionar materiales bajo criterios de resistencia física y térmica y no solo de optimización de volumen.

La evaluación y selección óptima de dichos materiales requiere de una caracterización bajo condiciones extremas de ensayo. Bajo esta premisa, el acoplamiento numérico entre la dinámica de fluidos computacional (CFD) y la transferencia de calor conjugada (CHT) permite modelar la física del TR, minimizando los costes de fabricación y los riesgos de seguridad asociados a los métodos experimentales tradicionales [5].

Por ello, este trabajo pretende desarrollar una metodología computacional que permita la creación de sistemas de almacenamiento de baterías seguro.

## OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo principal el análisis de la dinámica de fluidos y gestión térmica del diseño del contenedor de seguridad que almacena y transporta LiB. Para ello, se utilizan técnicas de simulación numérica CFD-CHT para la modelación del TR y la posible propagación que ocurre dentro del módulo, así como ofrecer una visualización clara de los efectos térmicos que debe soportar el contenedor.

El paquete computacional empleado para la realización de las simulaciones es Star-CCM+. Dentro del mismo, se considerarán las físicas relacionadas con el transporte de masa, momento y energía del volumen fluido, así como la transferencia de calor entre volumen fluido y sólido (CHT), y la transferencia de calor por conducción dentro del sólido. Respecto a la física del volumen fluido, las ecuaciones de transporte mencionadas se pueden resumir en la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi$$

De dicha ecuación, $\rho$ representa la densidad, $t$ el tiempo, $\phi$ la variable asociada a cada ecuación de transporte (1 en el caso de la conservación de la masa, el vector velocidad en el caso de la conservación del momento, y la entalpía en el caso de la energía). De manera análoga, $\Gamma$ adopta un valor dependiendo de la ecuación, siendo este cero para la continuidad, la viscosidad en el caso de la conservación de momento lineal, y la conductividad sobre el calor específico en la ecuación de conservación de la energía. $S_\phi$ solo adquiere valor en la ecuación de la energía, pues es ahí donde se considera el aporte energético por la combustión de gases.

Por otro lado, ya que en dichas simulaciones se va a considerar la presencia de las principales especies gaseosas características de la fuga térmica ($H_2$, $CO_2$, CO, $CH_4$ y $C_2H_6$), es necesario incluir la ecuación de transporte de especies. En tal caso, $Y_i$ representa la fracción másica de cada una de las especies, $\rho D_i$ es el producto de la densidad por la difusividad, y el término fuente representa las especies consumidas/producidas por la combustión. La turbulencia también juega un papel fundamental. Por su bajo coste computacional y alta representatividad de los resultados, se ha optado por un modelo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) $k-\varepsilon$ para caracterizar la intensidad y tasa de disipación turbulenta [6].

Para poder simular el calor generado por un proceso de fuga térmica es necesario caracterizar el evento a nivel experimental previamente, en el que se somete a la celda a un aumento de temperatura por encima de las temperaturas de operación seguras indicadas por el fabricante. A partir de cierto valor, las reacciones exotérmicas aumentan significativamente el aporte energético que se traduce en un incremento sustancial de la temperatura. De dicha curva, se puede extraer una tabla de datos en las que se correlaciona la tasa de liberación de calor con la temperatura a la que esta ocurre, tal y como se observa en la (Figura 1).

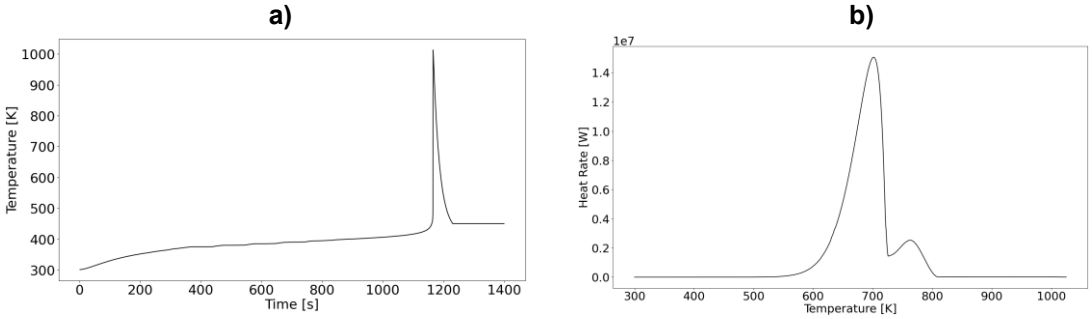



**Figura 1.** Temperatura y calor aportado de la celda de ion litio considerada. a) Evolución de temperatura con el tiempo. b) Evolución del calor aportado con respecto a la temperatura de la celda.

Para la aplicación se está considerando que se transportan módulos de baterías como los indicados en la Figura 2, considerando que la cantidad a transportar por cada módulo es de 9.7 kWh, siendo representado por la Figura 2a, siendo simplificado en una carcasa de 558 x 116 x 180 mm. El sistema de almacenamiento consta de un cajón separado en tres compartimentos. Dos de ellos para el almacenamiento y transporte de los módulos de baterías, y el tercero (el central) para la gestión y evacuación de gases característicos de TR, representado en la Figura 2b.

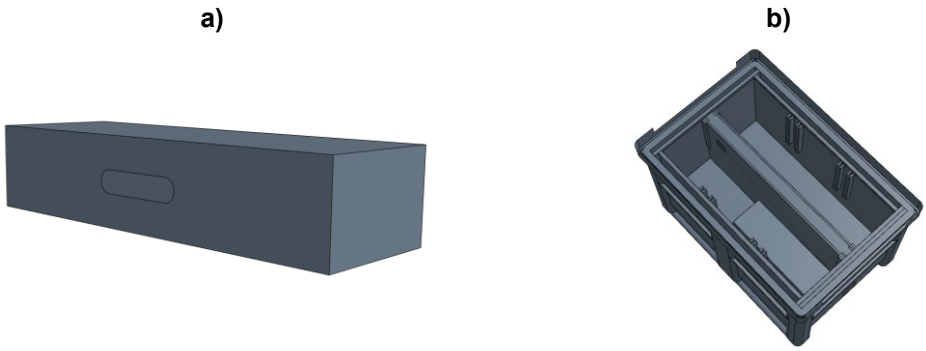



**Figura 2.** Geometría del módulo de batería simplificado y sistema de almacenamiento. a) Modulo considerado. b) Sistema de almacenamiento de módulos propuesto.

A su vez, se ha caracterizado el proceso de eyección de gases durante el TR. Para ello, se ha escalado la masa de gas eyectada por una celda a la energía que contiene el módulo propuesto. Debido a la carencia de información respecto a la velocidad de eyección de estos, se ha estimado que el gasto másico de los gases es lineal con la liberación de energía, tal y como se establece en las siguientes ecuaciones. En primer lugar, se define un parámetro que define el estado del TR del módulo, siendo 0 como ausencia de TR, y 1 cuando este haya acabado de producirse. De dicha manera, y en base a la masa total eyectada estimada ($m_{lost}$), se calcula el gasto másico de los gases.

$$P_v = \int E_{lib}(V)dV/E_{max}$$

$$\dot{m} = \frac{dP_v}{dt} \cdot m_{lost}$$

Por otro lado, para caracterizar la combustión de dichos gases, se asume que la mezcla reacciona de manera instantánea una vez se mezcla con el oxidante, tal y como se indica en la siguiente ecuación.

$$aH_2 + bCO + cCO_2 + dCH_4 + eC_2H_4 + f(O_2 + 3.76\,N_2) \rightarrow\ gCO_2 + iH_2O$$

Geométricamente, se han colocado 3 módulos de baterías apilados ya que así se contempla en la aplicación real del sistema de transporte de baterías. Dos posicionamientos distintos de los módulos han sido recreados, situándolos en uno de los extremos disponibles del cajón, tal y como se observa en la Figura 3.

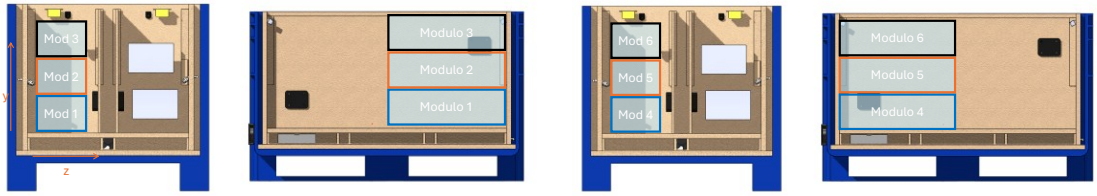



**Figura 3.** Modelos geométricos del sistema de almacenamiento y transporte de módulos de baterías.

Finalmente, se ejecutó una matriz de diseño computacional compuesta por seis ensayos para analizar la configuración óptima de los módulos de batería en el recinto de confinamiento. La metodología implicó la activación secuencial de los tres módulos en su posición inicial y, seguidamente, repetir el proceso tras invertir su posición inicial, según las geometrías previamente mostradas, simulando las diferentes casuísticas de fenómeno de TR que se podrían dar en el sistema.

## RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos de las seis simulaciones numéricas realizadas asociadas al presente trabajo. A continuación, se muestra la evolución de la temperatura para el caso donde el TR fue activado para el módulo inferior en lado izquierdo del compartimiento, debido a que las otras simulaciones numéricas exhiben un comportamiento físico similar. Cómo se evidencia en la Figura 4.a, el módulo afectado experimenta un incremento abrupto y severo de temperatura, alcanzando un valor máximo de 816 K y registrando una liberación de energía equivalente a 0.9 MJ. Por otra parte, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 4.b, se muestra la temperatura y presión máxima obtenida dentro del contendor de 2090 K y 2,8 bar, respectivamente.

A pesar del repunte térmico en el módulo inferior y del contacto entre las estructuras, no se induce la propagación del TR hacia los módulos intermedio y superior. Este comportamiento se atribuye directamente a la elevada inercia térmica de los módulos adyacentes, manteniendo sus temperaturas por debajo de la temperatura de activación durante el transcurso del evento.

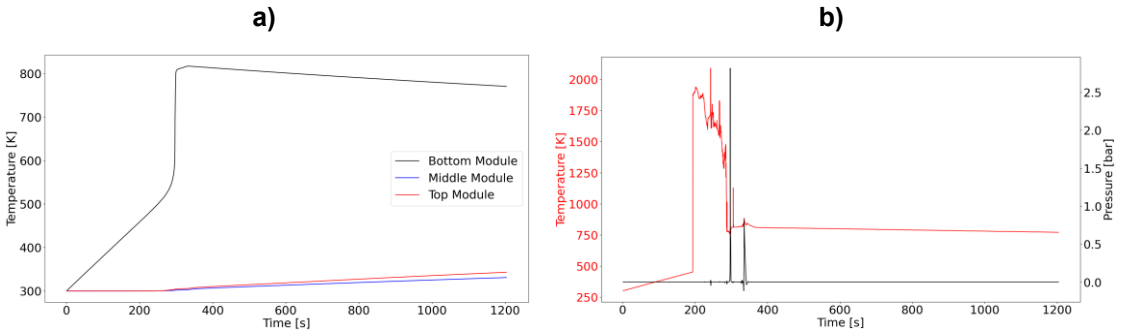



**Figura 4.** Evolución de la temperatura de las baterías ion litio y temperatura y presión del compartimiento. a) Temperatura de los tres módulos de batería. b) Temperatura y presión máxima alcanzada dentro del compartimiento.

Al iniciarse el TR, el gasto másico de los gases induce un flujo reactivo de alta velocidad. Cómo se logra evidenciar en la Figura 5, el gas a alta temperatura logra evacuarse hacia el compartimento central diseñado para la gestión de gases. No obstante, las paredes del contenedor adyacentes al módulo activo experimentan severos gradientes térmicos debido a la transferencia de calor por conducción sólida y convección forzada turbulenta, lo que justifica la necesidad de una selección rigurosa de materiales resistentes a la fatiga térmica.

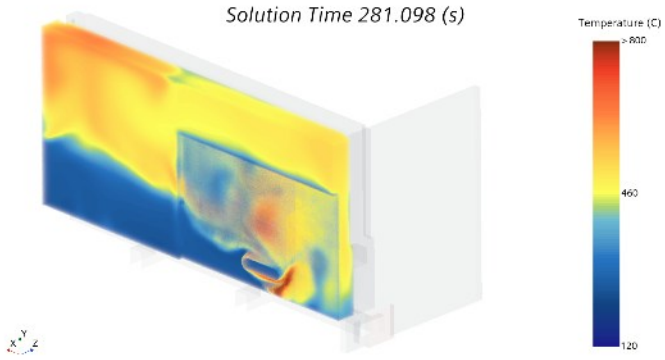



**Figura 5.** Evolución del campo de temperatura dentro del módulo para un determinado instante de tiempo.

## CONCLUSIONES

A partir del modelado numérico multicomponente y el análisis térmico del sistema de transporte de baterías de ion-litio propuesto, se extraen las siguientes conclusiones principales:

- **Validación de la Metodología CFD-CHT:** El acoplamiento numérico (CFD-CHT) implementado en Star-CCM+ demostró ser una herramienta robusta y de bajo coste computacional para predecir la física compleja de la fuga térmica, logrando integrar con éxito el transporte de especies reactivas, turbulencia y la transferencia de calor entre el fluido y el sólido. Sin embargo, debe considerarse que el gasto másico de los gases se basó en la hipótesis de linealidad respecto a la liberación de energía. En un escenario real la eyección puede presentar dinámicas transitorias más abruptas o pulsantes. Esto podría intensificar

localmente los gradientes térmicos y los picos de presión transitorios en las fases iniciales del TR, aspecto que deberá ser contrastado en futuras validaciones experimentales.

- **Mitigación Efectiva de la Propagación:** Los resultados de las seis simulaciones de la matriz de diseño confirman que la configuración del sistema previene de manera absoluta la propagación del TR entre módulos apilados.
- **Eficiencia del Sistema de Confinamiento:** Se demostró la viabilidad del diseño de cajón dividido en tres compartimentos. El canal central cumple satisfactoriamente con su función de canalizar y evacuar de forma segura el flujo multifásico y los productos de la combustión instantánea de los gases eyectados, registrando una presión máxima instantánea de 2,8 bar.
- **Criterio de Diseño de Materiales:** Aunque se evitó la propagación del incendio hacia los otros módulos, las simulaciones revelaron que el contendor se encuentra expuesto a gradientes de temperatura elevados, siendo la temperatura máxima alcanzada de 2090 K. Esto implica que el diseño de contenedores de seguridad para el transporte a gran escala debe priorizar la resistencia por esfuerzos térmicos extremos, por encima de criterios convencionales de optimización de volumen.

## REFERENCIAS

[1] García, Antonio; *et al.* (2025). “Coupled thermal runaway and combustion modeling for NMC811 Li-ion batteries safety: development and validation”, *Applications in Energy and Combustion Science,* v. 24, p.p. 100375. http://dx.doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100375.

[2] Peng, Rongqi; *et al.* (2024). “Thermal runaway modeling of lithium-ion batteries at different scales: Recent advances and perspectives”, *Energy Storage Materials,* v. 69, p.p. 103417. http://dx.doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103417.

[3] Wang, Gongquan; *et al.* (2024). “Advances and challenges in thermal runaway modeling of lithium-ion batteries”, *The Innovation,* v. 5. n. 4, p.p. 100624. http://dx.doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100624.

[4] García, Antonio; *et al.* (2025). “Experimental and numerical analysis of heat and gas generation during thermal runaway in NMC811 lithium-ion batteries under thermal abuse and inert conditions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* v. 253, p.p. 127536. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127536.

[5] Huang, Wensheng; *et al.* (2026). “Modelling and understanding the role of particles in vented thermal runaway in confined battery modules and packs”, *Journal of Energy Storage,* v. 141, p.p. 119235. http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2025.119235.

[6] Shih, Tsan-Hsing; *et al.* (1995). “A new k − ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows”, *Computers & Fluids,* v. 24, p.p. 227–238, http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T

# Mantenimiento por condición: estimación de la fiabilidad de equipos monitorizados

**Navarro, Enrique[(1)], Martón, Isabel[(2)], Sánchez, Ana Isabel[(2)], Martorell, Sebastián[(1)]**

*(1) Dpto. de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, ennapon@iqn.upv.es, smartore@iqn.upv.es*

*(2) Dpto. de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, ismarllu@eio.upv.es, aisanche@eio.upv.es*

## RESUMEN

En este estudio se presenta la metodología empleada para el desarrollo de modelos de mantenimiento basados en la condición, orientados a diagnosticar el estado de degradación de los equipos, estimar el momento del fallo y proporcionar soporte cuantitativo a la toma de decisiones de mantenimiento.

La metodología propuesta se puede sintetizar en los siguientes pasos: primero, se identifican las variables más relacionadas con el estado de degradación de los equipos y se procesan para facilitar la extracción de información. A continuación, se ajustan diferentes distribuciones para obtener el modelo de fiabilidad, lo que permite estimar la probabilidad de fallo en cada momento. Finalmente, se modela la evolución del indicador de degradación a lo largo de los ciclos de operación, lo que, unido al modelo de fiabilidad, permite proyectar la probabilidad de fallo a futuro y determinar el momento en el que se requerirá la intervención de mantenimiento.

Los resultados obtenidos en el caso de aplicación demuestran la viabilidad de la metodología para desarrollar herramientas que ayuden a tomar decisiones informadas en el riesgo de manera más realista.

**Palabras clave:** Mantenimiento por condición, fiabilidad, degradación, monitorización, planificación del mantenimiento.

## INTRODUCCIÓN

Las centrales nucleares (CCNN) españolas acumulan una larga experiencia de más de 40 años de operación y deben mantener en todo momento los más altos estándares de seguridad y fiabilidad en sus sistemas.

En el ámbito internacional, algunos organismos reguladores, como la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) en Estados Unidos, estiman que la implementación de técnicas de inteligencia artificial (IA) y *machine-learning* (ML) tendrá una importancia clave para mejorar las aplicaciones informadas en el riesgo, ayudando a conseguir una operación robusta y segura. Esta convicción se ve reflejada en su Plan Estratégico para 2023-2027, en el que se promueve la incorporación de técnicas de IA y ML [1].

Para los equipos monitorizados, el desarrollo de herramientas capaces de evaluar con precisión el estado de salud y predecir la vida remanente (RUL, del inglés *Remaining Useful Life*) de los equipos resulta de gran ayuda. Al aprovechar la información generada

por los sensores de los equipos se puede detectar la degradación y prevenir fallos, garantizando una operación segura y eficiente de las instalaciones.

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología para los equipos bajo mantenimiento por condición, vinculando sus señales con un modelo de fiabilidad y pronosticando su evolución para dar soporte a la planificación de las intervenciones.

## METODOLOGÍA

Tal y como se mencionaba anteriormente, el objetivo principal del estudio es desarrollar una herramienta de soporte en la toma de decisiones para los equipos monitorizados bajo mantenimiento por condición.

La idea principal es aprovechar las señales de los equipos monitorizados para construir indicadores de salud que permitan decidir cuándo llevar a cabo las tareas de mantenimiento. Para ello, primero se relaciona el valor de la señal con la fiabilidad del equipo y, seguidamente, se ajusta un modelo de regresión para poder extrapolar su valor a futuro, permitiendo anticiparse a los fallos antes de que se produzcan.

El Caso de Aplicación profundiza en la metodología seguida para desarrollar estos modelos, que consta de las siguientes etapas:

1. Preprocesado y selección del indicador de degradación.
2. Ajuste de la función de fiabilidad.
3. Efecto del mantenimiento.
4. Desarrollo del modelo de regresión.

## CASO DE APLICACIÓN

Ante la falta de datos de operación reales, se ha empleado la base de datos (BBDD) C-MAPSS (*Commercial Modular AeroPropulsion System Simulation*), que simula la evolución de la condición de turbinas de avión hasta el fallo. Estos datos han sido generados por la NASA y se encuentran disponibles en [2]. La BBDD se compone de cuatro *subsets* que combinan diferentes tipologías de fallo y condiciones de operación. Sin embargo, el Caso de Aplicación se centra en el caso más sencillo, *subset* FD001, donde sólo se considera un tipo de fallo y condiciones de operación constantes.

### Preprocesado y selección del indicador de degradación

Dado que el fenómeno que se pretende modelizar es la degradación, las señales más interesantes para relacionarlas con este proceso serán aquellas que presenten un comportamiento mayormente monotónico, ya que la degradación tiende a crecer de forma continua. No obstante, atendiendo al ruido presente en los datos, se decide suavizar las señales aplicando una media móvil ponderada exponencialmente (EWMA). La Figura 1 muestra el efecto de aplicar la EWMA sobre uno de los sensores.

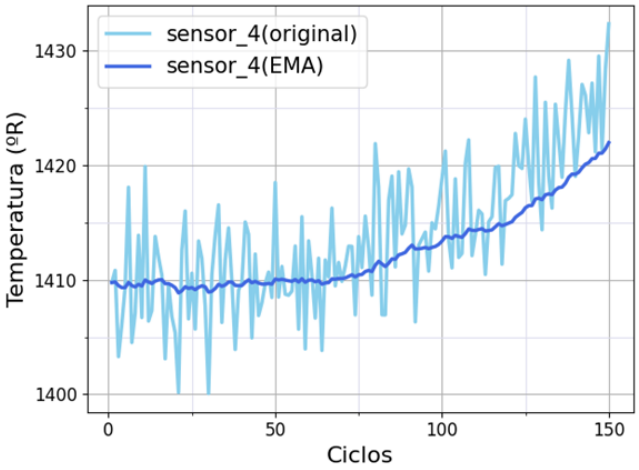



**Figura 1.** Evolución del sensor 4 para el motor 8 antes y después del preprocesado.

Una vez se han suavizado las señales, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson entre los sensores y el número de ciclos (vuelos) que lleva operando la turbina, puesto que, por definición, se trata de una variable monótona creciente. La Tabla 1 recoge el valor del coeficiente de correlación de los diferentes sensores.

**Tabla 1.** Coeficiente de correlación de Pearson entre los sensores y el número de ciclos.

| **Sensor** | **op.set1** | **op.set2** | **op.set3** | **s2** | **s3** | **s4** | **s6** | **s7** | **s8** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Correlación** | - | - | - | 0.61 | 0.65 | 0.64 | 0.24 | -0.60 | 0.45 |
| **Sensor** | **s9** | **11** | **s12** | **s13** | **s14** | **s15** | **s17** | **s20** | **s21** |
| **Correlación** | 0.46 | 0.62 | -0.60 | 0.46 | 0.37 | 0.62 | 0.66 | -0.64 | -0.64 |

Atendiendo a la Tabla 1, la mayoría de los sensores presentan una correlación fuerte, con cinco de ellos por encima de $|0.63|$. Finalmente, se escogió el sensor 4, que se corresponde con la temperatura (en grados Rankine, °R) a la salida de la turbina de baja presión (más información sobre los sensores se puede encontrar en [3]).

### Ajuste de la función de fiabilidad

Una vez seleccionada la señal asociada al indicador de salud, el siguiente paso consiste en vincularla a un modelo de fiabilidad. Para ello, se prueba a ajustar diferentes distribuciones sobre el histograma de valores del sensor 4 en el momento del fallo. La Tabla 2 recoge las distribuciones probadas y sus valores de verosimilitud.

**Tabla 2.** Verosimilitud de las funciones de distribución ajustadas al sensor 4 en el fallo.

| **Distribuciones** | **Exponencial** | **Normal** | **Lognormal** | **Weibull** |
|---|---|---|---|---|
| **Verosimilitud** | -251.36 | -212.43 | -212.43 | -210.97 |

Dado que la distribución Weibull es la que obtiene una mayor verosimilitud, se utiliza para vincular el valor del sensor con la fiabilidad a través de la siguiente ecuación:

$$R(s4) = \begin{cases} 1, & s4 \leq 1413.98 \\ \exp\left[-\left(\frac{s4 - 1413.98}{8.98}\right)^{4.73}\right], & s4 \geq 1413.98 \end{cases}$$

En la Figura 2 se muestran, por una parte, el histograma de valores del sensor 4 en el momento del fallo, la distribución Weibull ajustada y la función de fiabilidad definida en

la ecuación anterior, y, por otra, el resultado de traducir la señal que se muestra en la Figura 1 a términos de fiabilidad.

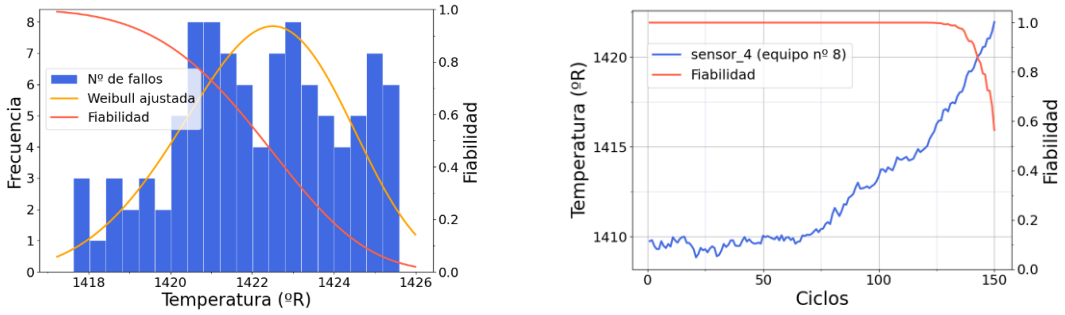



**Figura 2.** Histograma de fallos con el ajuste de fiabilidad (izda.) y evolución para el motor 8 (dcha.).

Al expresar la fiabilidad en función del sensor se vuelve factible establecer un límite ($R_{lim}$) a modo de criterio para la intervención de mantenimiento. En este caso, si se decidiese trabajar con un valor límite de fiabilidad de 0.9, el valor correspondiente del sensor 4 sería de 1419.5 (ºR).

### Efecto del mantenimiento

Con la relación entre el valor del sensor y la fiabilidad definida, se puede incluir el efecto del mantenimiento en el estado de salud del equipo que se está monitorizando. A continuación se presentan algunos ejemplos de cómo registrar la evolución de la condición de un equipo, incluidas las intervenciones de mantenimiento. En la Figura 3 y la Figura 4 se puede observar cómo varían la fiabilidad y la temperatura, tras cinco mantenimientos, cuando se modifican parámetros como la efectividad ε (que se estimaría a partir del histórico de intervenciones de mantenimiento) y el criterio de actuación (valor límite de fiabilidad, $R_{lim}$).

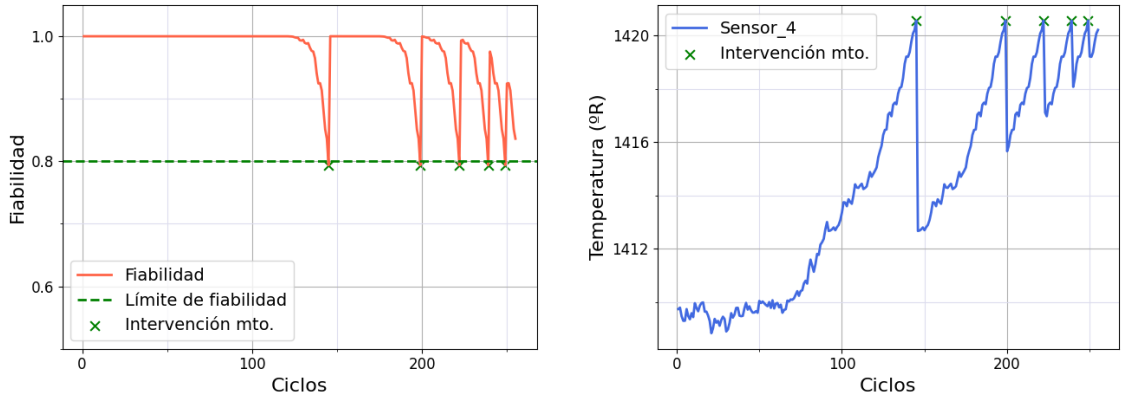



**Figura 3.** Evolución de la fiabilidad y del sensor 4 para ε = 0.7 y $R_{lim}$ = 0.8.

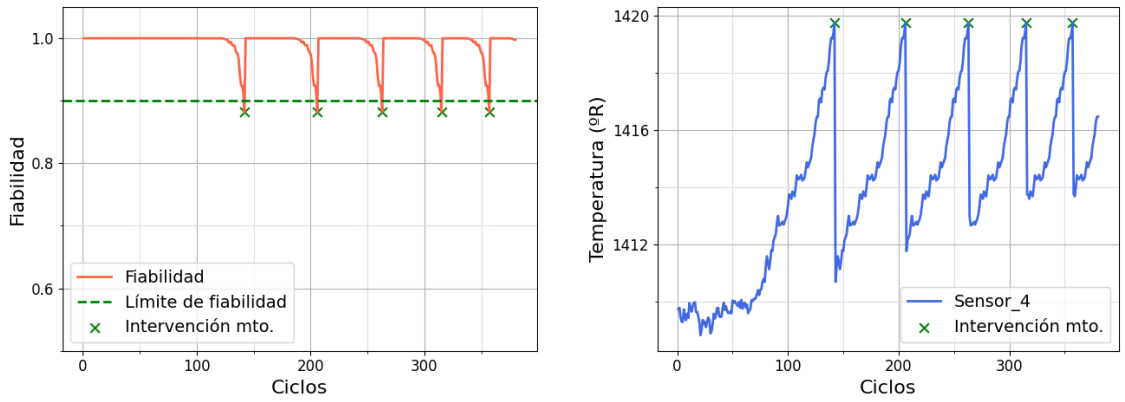



**Figura 4.** Evolución de la fiabilidad y del sensor 4 en el caso en que ε = 0.9 y $R_{lim}$ = 0.9.

Las Figuras 3 y 4 ponen de manifiesto que, para el conjunto de datos utilizado, el impacto de un mantenimiento efectivo supera ampliamente el límite de fiabilidad establecido, lo que permite operar durante más tiempo con mayor seguridad. Además, disponer de la evolución de la degradación a medio plazo tras las intervenciones de mantenimiento ofrece un valioso punto de vista para evaluar el momento en que conviene más reemplazar un equipo que continuar con su mantenimiento, lo que aporta un apoyo adicional a la gestión de activos.

### Desarrollo del modelo de regresión

Finalmente, se desarrolla un modelo para la prognosis del comportamiento del sensor a futuro con el objetivo de anticiparse al momento del mantenimiento y poder gestionar con anterioridad los materiales y el personal necesarios para llevarlo a cabo. Para ello, se utiliza un modelo mixto cuadrático [4] por su capacidad de captar curvaturas y diferenciar comportamientos entre motores. El modelo utiliza los últimos 40 ciclos disponibles para ajustarse y, a partir de ahí, proyectar la evolución del sensor hasta alcanzar el límite de fiabilidad establecido, obteniéndose un resultado como el que se muestra en la Figura 5.

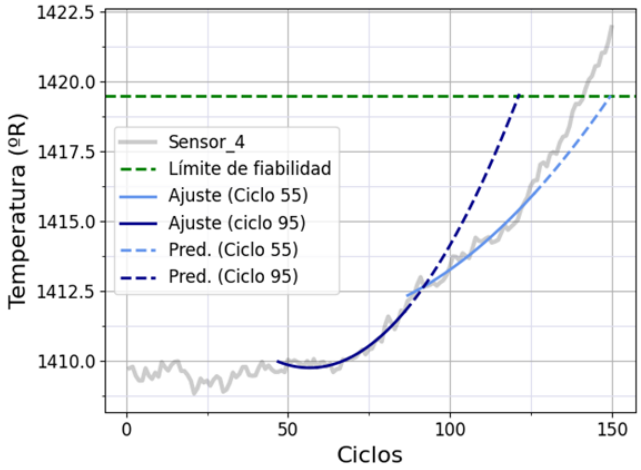



**Figura 5.** Ciclo en el que se alcanzará el límite de fiabilidad según el modelo cuadrático mixto (14 y 55 ciclos antes del límite).

El gráfico de la Figura 5 sugiere que la precisión del modelo aumenta a medida que se utilizan ciclos más cercanos al momento en que se alcanza el límite.

Se espera que el uso de técnicas de ML más complejas para llevar a cabo la prognosis de la señal mejore significativamente el desempeño del modelo, habilitando la función de predicción y permitiendo a los usuarios planificar el mantenimiento con antelación y de forma robusta.

Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados obtenidos motivan la continuación del estudio y la aceptación de nuevos retos como el desarrollo de modelos que puedan trabajar con múltiples mecanismos de degradación y condiciones de operación.

## CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolla una metodología para aprovechar las señales de los sensores y convertirlas en indicadores de degradación que permitan estimar la fiabilidad de los equipos. El caso de aplicación respalda la validez del enfoque propuesto para mejorar los planes de mantenimiento y de gestión de la vida útil de las CCNN mediante el desarrollo de modelos de mantenimiento basados en la condición.

Se observa que es posible elaborar criterios de actuación a partir del seguimiento de las variables monitorizadas. Aunque la precisión del modelo de regresión todavía no es muy elevada, permite predecir el momento en el que debería realizarse el mantenimiento, lo que ofrece la posibilidad de anticiparse al fallo y de realizar una planificación del mantenimiento informada sobre el riesgo a nivel orientativo. Como trabajo futuro, se prevé el uso de técnicas de aprendizaje automático más sofisticadas que permitan afrontar el problema de la diagnosis de diferentes causas de fallo y contribuyan a mejorar la detección de tendencias de degradación e incrementar la precisión de las predicciones.

## AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Consejo de Seguridad Nuclear por la subvención concedida dentro del programa de subvenciones de I+D+i 2023 (SUBV-9 2023).

## REFERENCIAS

[1] United States Nuclear Regulatory Commission. (2023). *NUREG-2261: Artificial intelligence strategic plan, fiscal years 2023-2027*. U.S. NRC.

[2] NASA Prognostics Data Repository. (2008). *Commercial modular aero-propulsion system simulation (C-MAPSS) data set.* https://data.nasa.gov/dataset/cmapss-jet-engine-simulated-data

[3] Ramasso, Emmanuel; Saxena, Abhinav (2014). “Performance benchmarking and analysis of prognostics methods for C-MAPSS datasets”. *International Journal of Prognostics and Health Management, 5*(2), 1-15. https://papers.phmsociety.org/index.php/ijphm/article/view/2236

[4] Jiang, J. (2022). “Mixed Effects Models”. *Large sample techniques for statistics.* Springer Texts in Statistics. Springer, 417-463. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91695-4_12

# Una revisión unificada de la seguridad en IA: aprendizaje automático adversario, grandes modelos de lenguaje y amenazas cloud-native en Kubernetes

**Ali, Waqas[(1)], Molina-Picó, Antonio[(2)], Seguí-Moreno, Juan[(1)]**

*(1) Departamento de Informática de Sistemas y Computadores, Universitat Politècnica de València, Ferrándiz y Carbonell, 03801, Alcoi, wali2@doctor.upv.es, juansegui@upv.es*

*(2) Instituto Tecnológico de Informática, Universitat Politècnica de València, Pza. Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801, Alcoi (Alicante), antoniomolina@disca.upv.es*

## RESUMEN

La rápida integración de la IA en arquitecturas cloud-native ha mejorado la escalabilidad, pero también ha expuesto marcos de seguridad fragmentados. Esta revisión analiza la evolución de la seguridad en IA, conectando el aprendizaje automático adversario, los riesgos de los Grandes Modelos de Lenguaje y las vulnerabilidades cloud-native. A partir de 20 artículos, se clasifican las amenazas a lo largo de la vida del aprendizaje automático y se comparan estrategias defensivas.

Los resultados evidencian una brecha de investigación entre la orquestación de contenedores y la integridad de los modelos, junto con ataques frecuentes a LLM como sufijos adversarios e inyección de prompts, además del “alignment tax”. Se propone una taxonomía unificada de amenazas y una evaluación de defensas como el entrenamiento adversario y DevSecOps, integrando riesgos de infraestructura y de modelo para orientar el diseño de sistemas de IA más resilientes en entornos cloud.

**Palabras clave:** Seguridad en Inteligencia Artificial, Aprendizaje Automático Adversario, Grandes Modelos de Lenguaje (LLM), Seguridad Cloud-Native.

## INTRODUCCIÓN

La IA y el Aprendizaje Automático se utilizan ampliamente en ámbitos críticos como sanidad, finanzas, ciberseguridad y sistemas autónomos. El paso a infraestructuras cloud-native con Kubernetes ha permitido despliegues escalables, mientras que los LLM han mejorado la interacción humano–máquina, aunque también han incrementado los riesgos de seguridad y privacidad en modelo e infraestructura [1],[2],[3],[4].

La literatura muestra que los sistemas de IA son vulnerables a ataques adversarios como evasión y envenenamiento en ML tradicional, así como inyección de prompts, jailbreaks y sufijos adversarios en LLM [5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]. En paralelo, las arquitecturas cloud-native introducen riesgos como vulnerabilidades en contenedores, orquestación insegura, ataques a la cadena de suministro y fuga de datos mediante inferencia de membresía e inversión de modelo [12],[13],[1],[14].

A pesar de la investigación existente, la seguridad en IA sigue fragmentada entre ML adversario, LLM y cloud security, con poca integración entre dominios. Este trabajo propone una visión unificada mediante una taxonomía de amenazas, una comparación de defensas como entrenamiento adversario, privacidad diferencial y DevSecOps, e identifica brechas y líneas futuras para el diseño de sistemas de IA seguros en entornos Kubernetes [6],[13],[1],[16].

Las principales contribuciones de este trabajo son: (i) una visión unificada de las amenazas que afectan a los modelos de aprendizaje automático, los sistemas LLM y las infraestructuras de IA cloud-native; (ii) un análisis comparativo de los mecanismos de defensa existentes, incluyendo el entrenamiento adversario, las técnicas de

preservación de la privacidad y los marcos de seguridad basados en DevSecOps; y (iii) la identificación de las brechas de investigación actuales y de futuras direcciones para el despliegue seguro de IA en entornos basados en Kubernetes [6],[13],[1],[16].

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este artículo es presentar una revisión concisa e integrada de los retos de seguridad en los sistemas de IA modernos, centrándose en el aprendizaje automático adversario, los grandes modelos de lenguaje (LLM), las infraestructuras cloud-native y los despliegues basados en Kubernetes. A diferencia de trabajos previos que tratan por separado las amenazas a nivel de modelo y de infraestructura, este estudio unifica estas perspectivas bajo un único marco de seguridad [15],[1],[7].

Esta revisión clasifica las amenazas de seguridad en IA en categorías tales como ataques adversarios, envenenamiento de datos, fuga de privacidad, vulnerabilidades específicas de LLM y riesgos cloud-native. También revisa técnicas clave de defensa que incluyen el entrenamiento adversario, el saneamiento de entradas, la monitorización en tiempo de ejecución, la privacidad diferencial y los controles de seguridad basados en DevSecOps [5],[6],[9],[16]. Adicionalmente, examina cómo entornos como el aprendizaje federado, los pipelines de Kubernetes y las plataformas de IA cloud-native introducen nuevas superficies de ataque que afectan a la fiabilidad [17],[13],[16].

Para cumplir dicho objetivo, se comparan más de veinte estudios representativos mediante un análisis estructurado de métodos de ataque, defensas, conjuntos de datos y limitaciones, identificando brechas clave de investigación en ataques adversarios adaptativos, alineamiento de LLM, preservación de la privacidad y monitorización de seguridad escalable [17],[11],[7],[16]. Para ello, se seleccionaron 20 artículos publicados entre 2020 y 2026 en IEEE Xplore, ACM, Springer y arXiv, usando palabras clave relacionadas con aprendizaje automático adversario, seguridad en LLM, inyección de prompts y seguridad de IA cloud-native. La selección se basó en su relevancia frente a amenazas a la IA, mecanismos de defensa y entornos de despliegue, considerando que esta muestra es suficiente para identificar tendencias consistentes y realizar un análisis comparativo significativo, manteniendo el equilibrio entre profundidad analítica y viabilidad metodológica dentro del alcance de la revisión.

## RESULTADOS

Esta sección presenta los hallazgos de la revisión basados en un análisis sistemático de la literatura reciente sobre seguridad en IA. Los resultados se organizan para destacar las principales categorías de amenazas, incluyendo los ataques de aprendizaje automático adversario, las vulnerabilidades cloud-native y basadas en Kubernetes, los riesgos de seguridad de los grandes modelos de lenguaje (LLM) y las perspectivas comparativas entre distintos entornos de despliegue de IA. La discusión resume además los mecanismos de defensa correspondientes e identifica sus limitaciones a la hora de hacer frente a comportamientos adversarios adaptativos y en evolución.

### Taxonomía de amenazas de seguridad en IA

La literatura revisada muestra que la seguridad en IA abarca múltiples capas, incluyendo el comportamiento del modelo, la integridad de los datos, la privacidad y la infraestructura. Tradicionalmente, el aprendizaje automático adversario se ha centrado en ataques de evasión y envenenamiento que degradan el rendimiento del modelo, junto con ataques de privacidad como la inferencia de membresía y la inversión de modelo que exponen datos sensibles [5],[6],[7],[12],[13]. Con la aparición de los LLM, surgen nuevas amenazas como la inyección de prompts, jailbreaks y sufijos adversarios, que explotan el comportamiento generativo y la obediencia a instrucciones [8],[9],[10],[11]. En paralelo, los sistemas cloud-native enfrentan riesgos a nivel de infraestructura, como vulnerabilidades en contenedores, orquestación insegura

y ataques a la cadena de suministro [1],[2]. Las defensas combinan entrenamiento adversario, detección de anomalías, saneamiento de prompts, privacidad diferencial y arquitecturas Zero Trust, aunque siguen siendo limitadas frente a adversarios adaptativos y conllevan costes computacionales y de rendimiento [5],[13],[1],[7].

## Seguridad en la nube y en IA sobre Kubernetes

Las infraestructuras cloud-native de IA aumentan la superficie de ataque, especialmente en entornos Kubernetes, donde configuraciones inseguras, escalada de privilegios, APIs expuestas y ataques a la cadena de suministro pueden comprometer modelos y datos. Además, las plataformas MLaaS son vulnerables a ataques de extracción de modelos, inferencia de membresía y filtración de datos en la nube [1],[2],[12],[13].

Para mitigar estas amenazas, se proponen técnicas de seguridad basadas en IA como detección de anomalías, monitorización en tiempo real, DevSecOps y planificación segura. También se emplean aislamiento de contenedores, privacidad diferencial y arquitecturas Zero Trust, aunque su eficacia se ve limitada por problemas de escalabilidad y complejidad de implementación en entornos reales [1],[14],[2].

## Riesgos de seguridad en LLM

La adopción de LLM ha impulsado la investigación en seguridad hacia ataques basados en prompts, como la inyección de instrucciones maliciosas, los jailbreaks y técnicas automatizadas como GCG, que generan sufijos adversarios capaces de eludir salvaguardas incluso en modelos alineados [8],[9],[4],[11],[10]. Las defensas actuales incluyen RLHF, ajuste por instrucciones, filtrado de prompts y guardrails externos [3],[17],[8]. Aunque mejoran la robustez, siguen siendo vulnerables a adversarios adaptativos e introducen el “alignment tax”, donde mayores restricciones de seguridad reducen la calidad y utilidad del modelo, manteniéndose el reto de equilibrar seguridad, rendimiento y usabilidad.

## Análisis comparativo

El análisis comparativo muestra diferencias en los patrones de ataque y defensa entre ML tradicional, LLM e infraestructuras cloud-native. En ML clásico predominan los ataques de evasión y envenenamiento sobre clasificadores estáticos evaluados con datasets como MNIST, CIFAR-10 o CIC-IDS2017 [5],[6],[18], mientras que en LLM destacan la inyección de prompts, jailbreaks y técnicas de elusión del alineamiento en interfaces de lenguaje natural [19],[8],[10]. En el ámbito cloud-native, la investigación se centra en amenazas de infraestructura como intrusiones, malware, explotación de contenedores y vulnerabilidades en la cadena de suministro [1],[2]. Las defensas más comunes incluyen entrenamiento adversario, detección de anomalías, privacidad diferencial, monitorización en tiempo real y DevSecOps, aunque en general se consideran reactivas y limitadas frente a ataques adaptativos [5],[13],[1],[11],[7].

**Tabla 1.** Análisis comparativo de los estudios existentes sobre seguridad en IA

| Ref | Tipo de ataque | Dominio | Estrategia de defensa | Limitación principal |
|---|---|---|---|---|
| [1] | Cadena de suministro y DDoS | Cloud-native AI | DevSecOps + OPA | Complejidad de la pila tecnológica |
| [2] | Malware en contenedores | Kubernetes | Seguridad basada en IA | Problema del arranque en frío |
| [3] | Ataque multimodal y FL | LLM | RLHF + filtrado | Ciclo de defensa reactivo |
| [4] | Taxonomía de inyección de prompts | LLM | Lista de verificación de vulnerabilidades | Mayoritariamente cualitativo |
| [5] | Evasión | ML | Entrenamiento adversario, feature squeezing | Débil frente a ataques adaptativos |
| [6] | Envenenamiento y evasión | ML | Ensemble, entrenamiento adversario | Las defensas van por detrás del crecimiento del AML |
| [7] | Envenenamiento y extracción | ML | Saneamiento + parcheo | Mejoras defensivas temporales |

| Ref | Tipo de ataque | Dominio | Estrategia de defensa | Limitación principal |
|---|---|---|---|---|
| [8] | Inyección indirecta | LLM | Aislamiento estructural | No puede separar intención de datos |
| [9] | Inyección indirecta | LLM | Aislamiento estructural | No puede separar intención de datos |
| [10] | Ataque de sufijo GCG | LLM | Alineamiento mediante RLHF | Requiere gradientes de caja blanca |
| [11] | Jailbreak cognitivo | LLM | Taxonomía de mecanismos | Débil frente a ataques adaptativos |
| [12] | Inferencia de membresía | Cloud-native AI | Regularización | Baja precisión en clases minoritarias |
| [13] | Fuga de privacidad | LLM | Privacidad diferencial | Degradación de utilidad |
| [14] | Intrusión y fraude | Cloud-native AI | Detección de anomalías | Problemas de escalabilidad y privacidad |
| [15] | Envenenamiento y evasión | ML | Seguridad por diseño | Implementación técnica limitada |
| [16] | Robo de PI y envenenamiento | ML | Entrenamiento robusto + DP | “Alignment Tax” |
| [17] | Alineamiento de seguridad | LLM | RLHF, SFT | Cobertura de modelos limitada |
| [18] | Ataques adaptativos | ML | Marco de evaluación / lista de verificación | Evaluación dependiente del contexto |
| [19] | Jailbreak (GCG/PAIR) | LLM | SemanticSmooth | Alta sobrecarga en tiempo de ejecución |
| [20] | Inversión de modelo | ML | Marco de optimización | Limitado a softmax / regresión logística |

El análisis comparativo presentado en la Tabla 1 pone de relieve la diversidad de vectores de ataque, mecanismos de defensa y limitaciones en la investigación sobre seguridad en aprendizaje automático, LLM e IA cloud-native. Los hallazgos indican una concentración creciente de estudios sobre amenazas específicas de los LLM y sobre vulnerabilidades a nivel de infraestructura, lo que refleja la creciente complejidad de los ecosistemas modernos de IA. Para ilustrar mejor estas tendencias, la Figura 1 muestra la distribución de las principales amenazas de seguridad en IA identificadas.

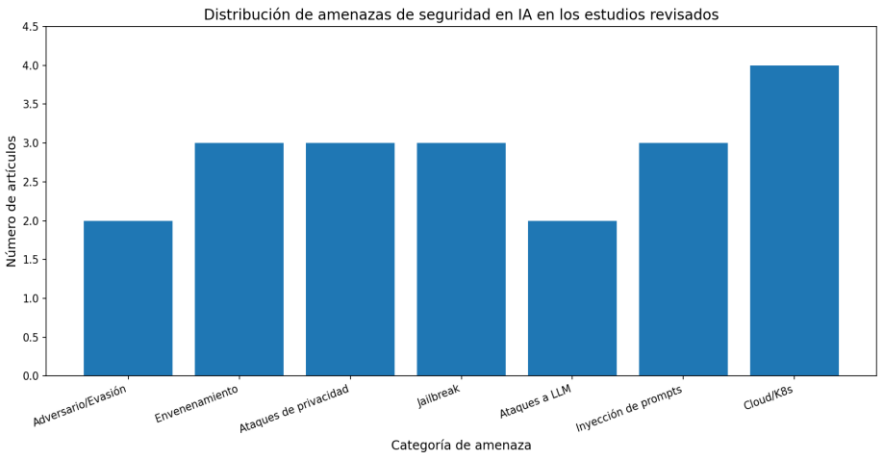



**Figura 1**. Distribución de amenazas de seguridad en IA en los estudios revisados

## CONCLUSIONES

Este trabajo ha revisado los principales retos de seguridad en sistemas modernos de IA, abarcando aprendizaje automático adversario, LLM y entornos cloud-native. Se evidencia que

estos sistemas están cada vez más expuestos a ataques como inyección de prompts, jailbreaks, fuga de privacidad y amenazas a nivel de infraestructura en plataformas basadas en Kubernetes, comprometiendo la confidencialidad, integridad y fiabilidad de las aplicaciones de IA. El análisis muestra que las defensas actuales —como entrenamiento adversario, RLHF, privacidad diferencial, detección de anomalías y enfoques DevSecOps— siguen siendo insuficientes frente a ataques adaptativos. Además, la convergencia entre vulnerabilidades de modelo e infraestructura refuerza la necesidad de marcos de seguridad integrados, aunque muchas soluciones introducen compromisos entre seguridad, escalabilidad y utilidad (alignment tax).

Finalmente, persisten retos clave como la falta de robustez frente a ataques en evolución, la ausencia de benchmarks estandarizados y la escasa validación en entornos reales de producción. La investigación futura debería centrarse en arquitecturas unificadas de seguridad para IA que integren monitorización en tiempo real, principios Zero Trust y orquestación segura, junto con marcos de evaluación y defensas adaptativas más realistas y escalables.

## AGRADECIMIENTOS

Expreso sinceramente mi gratitud a mi profesor Antonio Molina, por su guía continua y su apoyo académico a lo largo de este trabajo. También expreso un agradecimiento especial a Antonio Nácher Abad, CEO de *Heligrafics*, por su apoyo, motivación y ánimo durante la realización de este artículo.

## REFERENCIAS

[1] Theodoropoulos, Theodoros; Rosa, Luis; Benzaid, Chafika (2023). "Security in Cloud-Native Services: A Survey". International Journal of AI Security Survey.

[2] Aktolga, Ilter Taha; Kuru, Elif Sena; Sever, Yigit (2023). "AI-Driven Container Security Approaches for 5G and Beyond: A Survey". International Journal of AI Security Survey.

[3] Shayegani, Erfan; Mamun, Md Abdullah Al (2023). "Survey of Vulnerabilities in Large Language Models Revealed by Adversarial Attacks". International Journal of AI Security.

[4] Rossi, Sippo; Michel, Alisia Marianne; Mukkamala (2024). "An Early Categorization of Prompt Injection Attacks on Large Language Models". Proceedings of the 2024 Conference on AI.

[5] Macas, Mayra; Wu, Chunming; Fuertes (2024). "Adversarial examples: Attacks and defenses in DL-enabled cybersecurity systems". International Journal of AI Security Survey.

[6] Bountakas, Panagiotis; Zarras, Apostolis; Lekidis, Alexios (2023). "Defense strategies for Adversarial Machine Learning: A survey". International Journal of AI Security Survey.

[7] Qiao, Yan; Sathyanarayana, Nimitha Bangalore; Shi, Chaowei; He, Zefeng; Wang, Tao; Hou, Tao (2024). "A Survey on Adversarial Machine Learning: Attacks, Defenses, Real-World Applications, and Future Research Directions". International Journal of AI Security Survey.

[8] Geng, Tongcheng; Xu, Zhiyuan; Qu, Yubin (2026). "Prompt Injection Attacks: A Survey of Attack Methods, Root Causes and Defense Strategies". Int. Journal of AI Security Survey.

[9] Greshake, Kai; Abdelnabi, Sahar; Endres, Christoph (2023). "Not what you've signed up for: Compromising Real-World LLM-Integrated Applications with Indirect Prompt Injection". ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security.

[10] Zou, Andy; Wang, Zifan; Carlini, Nicholas (2023). "Universal and Transferable Adversarial Attacks on Aligned Language Models". arXiv preprint arXiv:2307.15043.

[11] Vinay, Vaishali (2026). "Jailbreaking Large Language Models: Techniques, Trends, Defenses, and Open Challenges". International Journal of AI Security Survey.

[12] Shokri, Reza; Stronati, Marco; Song, Congzheng (2017). "Membership Inference Attacks Against MLM". Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy.

[13] Liu, Bingyu (2026). "A Systematic Study of Security and Privacy in Large Language Models". Journal of Computer Research.

[14] Alzoubi, Yehia Ibrahim; M. Alok; Topcu, A. Ercan (2024). "Research trends in deep learning and machine learning for cloud computing security". Journal of Systems and Software.

[15] Biggio, Battista; Roli, Fabio (2018). "Wild Patterns: Ten Years After the Rise of Adversarial Machine Learning". Pattern Recognition, v. 84.

[16] He, Xinlei; Xu, Guowen; Han, Xingshuo; Wang, Qian (2025). "Artificial intelligence security and privacy: a survey". Journal of Computer Research.

[17] Zhao, Wayne Xin; Zhou, Kun; Li, Junyi (2023). "A Survey of Large Language Models". International Journal of AI Security Survey.

[18] Carlini, Nicholas; Athalye, Anish; Papernot, Nicolas (2019). "On Evaluating Adversarial Robustness". arXiv preprint arXiv:1902.06705.

[19] Ji, Jiabao; Hou, Bairu; Robey, Alexander; Wong, Eric; Chang, Shiyu; Pappas, George J.; Hassani, Hamed; Zhang, Yang (2025). "Defending Large Language Models against Jailbreak Attacks via Semantic Smoothing". International Conference on Learning Representations.

[20] Carreira-Perpiñán, Miguel Á.; Hada, Suryabhan Singh (2026). "Inverse classification with logistic and softmax classifiers: efficient optimization". Optimization Methods and Software.

# Herramientas para la evaluación del efecto del $H_2$ sobre la reactividad en sistemas de postratamiento de emisiones

**Noriega, Sebastian(1) ,de la Morena, Joaquín(1), Sanchis, Enrique J.(1), Piqueras, Pedro(1)**

*(1) CMT-Clean Mobility & Thermofluids, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia — ensanpac@mot.upv.es*

## RESUMEN

La introducción del hidrógeno como combustible o aditivo en motores de combustión interna genera trazas de $H_2$ sin quemar en el escape que modifican sustancialmente la reactividad de los sistemas de postratamiento (ATS). Evaluar este efecto de forma rigurosa requiere dos herramientas complementarias: una plataforma experimental que reproduzca la composición del escape con control independiente de cada especie, y un modelo computacional que interprete los resultados, desvele los mecanismos cinéticos subyacentes y extienda las predicciones a condiciones de operación real. Este trabajo presenta ambas herramientas, desarrolladas en el CMT–Clean Mobility & Thermofluids de la UPV: un Banco de Gases Sintéticos (SGB) con dosificación de hasta 14 especies puras y un modelo de orden reducido 1D con solución explícita para monolitos catalíticos de una y dos capas integrado en el software VATS. Su aplicación conjunta se ilustra sobre tres tecnologías de ATS: el catalizador de oxidación (OC), el catalizador de tres vías (TWC) y el catalizador de reducción selectiva con hidrógeno ($H_2$-SCR).

**Palabras clave:** hidrógeno, postratamiento de emisiones, banco de gases sintéticos, modelo de orden reducido, catalizador de oxidación, TWC, $H_2$-SCR, VATS.

## INTRODUCCIÓN

La incorporación del hidrógeno en el transporte avanza en dos frentes: su uso como combustible en motores de combustión interna y como aditivo en configuraciones dual-fuel. En ambos casos, una fracción del $H_2$ permanece sin quemar en el escape [1] y altera el equilibrio físico-químico de los sistemas de postratamiento (ATS).

Cinéticamente, el $H_2$ actúa como doble agente: compite con CO e hidrocarburos por los sitios activos de los metales del grupo platino y favorece la formación de radicales que abren rutas alternativas a menor temperatura [2]. Sus efectos varían según la tecnología: promotor cinético en catalizadores de oxidación (OC), condicionante de subproductos como $NH_3$ y $N_2O$ en catalizadores de tres vías (TWC), y agente reductor de $NO_x$ en sistemas $H_2$-SCR [3].

Evaluar estos efectos requiere herramientas a dos escalas: experimental, para reproducir con precisión la composición del escape variando la concentración de $H_2$ de forma controlada; y computacional, para desacoplar mecanismos cinéticos concurrentes y extrapolar a condiciones reales [4]. Este trabajo presenta el tándem desarrollado en el CMT: el Banco de Gases Sintéticos (SGB) y un modelo de orden reducido 1D con solución explícita integrado en VATS, cuya aplicación conjunta a tres tecnologías de ATS (OC, TWC y $H_2$-SCR) se ilustra en la sección 3. El objetivo del trabajo es demostrar que este tándem de herramientas permite evaluar de forma rigurosa el efecto del $H_2$ sobre la reactividad del ATS, desvelando los mecanismos cinéticos subyacentes y generando predicciones extrapolables a condiciones reales de operación.

## HERRAMIENTAS

**Banco de Gases Sintéticos (SGB).** El SGB es la plataforma experimental para la caracterización de catalizadores de ATS bajo condiciones controladas de composición de escape (Figura 1). Dispone de hasta 14 líneas de alimentación independientes con controladores de caudal másico Bronkhorst, un vaporizador CEM para la generación de vapor de agua (hasta el 15 % v/v) y un mezclador estático que garantiza la homogeneidad de la mezcla antes del reactor.

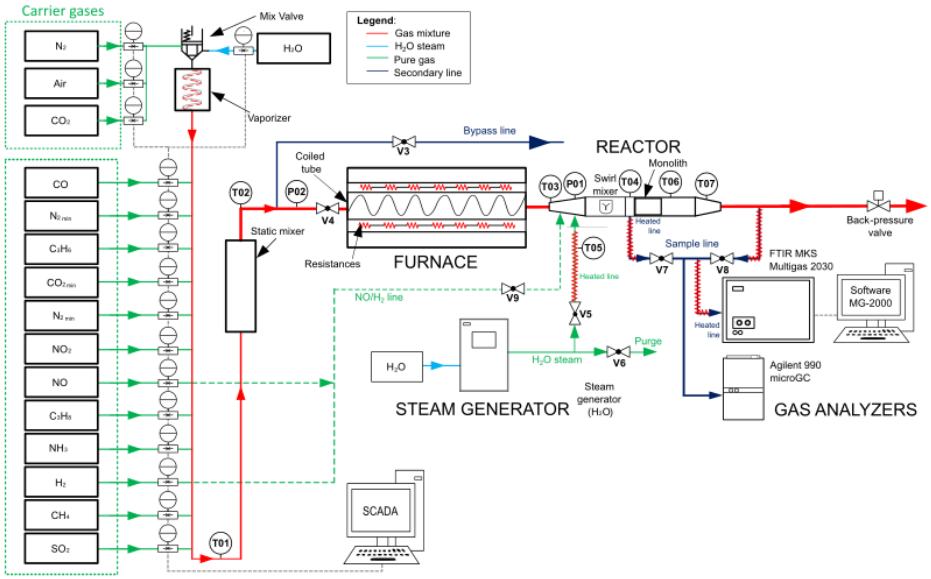



**Figura 1**. Esquema del Banco de Gases Sintéticos (SGB) del CMT–UPV.

La muestra catalítica se aloja en un reactor a la salida de un horno tubular con regulación PID de 2 kW. Para caudales de agua superiores a los del vaporizador CEM se dispone de un generador de vapor Cellkraft E-6000; las especies reactivas a alta temperatura (NO, $H_2$) se introducen en un mezclador aguas abajo del horno. La temperatura se monitoriza con termopares tipo K de 0,5 mm en la zona central del monolito. La caracterización química en continuo se realiza mediante un espectrómetro FTIR MKS Multigas 2030 para contaminantes primarios y subproductos, y un cromatógrafo de gases Agilent 990 microGC con columna Molsieve 5A y detector TCD para la cuantificación de $H_2$.

**Modelo computacional de orden reducido.** El modelo implementado en VATS adopta una filosofía de orden reducido orientada al cálculo en tiempo real, reproduciendo los fenómenos físico-químicos relevantes del reactor catalítico con bajo coste computacional. La estrategia central es derivar una solución analítica explícita para las ecuaciones de conservación de especies, evitando iteraciones numéricas en cada paso de tiempo. La formulación 1+1D resuelve el transporte convectivo en la dirección axial del canal y la difusión-reacción en la dirección transversal, bajo hipótesis de flujo incompresible y cuasi-estacionario, propiedades de entrada uniformes y gradiente radial de temperatura despreciable, lo que permite tratar todos los canales del monolito de forma homogénea. El modelo es aplicable a catalizadores de capa única y doble capa.

Las ecuaciones de conservación de las especies se escriben para la fase gas y para cada capa de washcoat. En ambas configuraciones, la fase gas satisface:

$$u_x \ \partial c_{n,g} / \partial x = -S_{s,g} \ k_{m,n} \ (c_{n,g} - c_{n,wc}) \quad (1)$$

donde $u_x$ es la velocidad axial del gas, $c_n$ la concentración de la especie n, $S_{s,g}$ la superficie específica de la fase gas y $k_{m,n}$ el coeficiente global de transferencia de masa. Este coeficiente combina en serie la resistencia externa y la resistencia interna.

En la configuración monocapa, la fase catalítica satisface un único balance en el washcoat:

$$\Sigma \nu_{r,n} R_{r,n} = S_{s,wc} k_{m,n} (c_{n,g} - c_{n,wc}) \quad (2)$$

El proceso de solución para este caso, descrito en detalle en [3], consiste en expresar las tasas de reacción como una combinación lineal de términos de primer orden y de orden cero respecto a la concentración de washcoat. Esta linealización permite desacoplar la ecuación de transporte de cada especie y escribir el flujo hacia el washcoat como una función explícita de la concentración en fase gas dentro del paso de tiempo, transformando la ecuación (1) en una EDO de primer orden con coeficientes constantes.

En la configuración bicapa, es necesario distinguir entre la capa catalítica superior (wc1) y la inferior (wc2), con sus propios balances de masa:

$$\Sigma \nu_{r,n} R_{r,n,wc1} = S_{s,wc1} J_{g,wc1} - S_{s,wc1} J_{wc1,wc2} \quad (3)$$

$$\Sigma \nu_{r,n} R_{r,n,wc2} = S_{s,wc1} J_{wc1,wc2} \quad (4)$$

Los términos *J* representan los flujos interfaciales: $J_{g,wc1}$ (entre gas y capa superior) y $J_{wc1,wc2}$ (entre capas). El proceso de solución para este caso, detallado en [4], es análogo al monocapa y da lugar igualmente a una EDO de primer orden en $c_{n,g}$ con coeficientes constantes durante el paso de tiempo.

En ambas configuraciones, la integración analítica de la EDO de transporte en fase gas sobre cada volumen de control produce una expresión cerrada de la forma:

$$c_{n,g,out} = [(1 - a_n) c_{n,g,in} - b_n] e^{-Ss,g\, km,n(1-an)\tau} + b_n / (1 - a_n) \quad (5)$$

Los coeficientes $a_n$ y $b_n$ son constantes dentro del paso de tiempo que encapsulan la contribución conjunta de la transferencia de masa y la cinética superficial. El parámetro $\tau = \Delta x/u_x$ es el tiempo de residencia en el volumen de control.

La solución de las especies se acopla a un modelo térmico 2D nodal (axial-radial) que resuelve los balances de energía en la fase gas, el sustrato sólido y las capas del encamisado mediante diferencias finitas centradas. La temperatura del gas sigue una ecuación de la misma forma que la ecuación (1), con solución analítica equivalente [4].

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN

**Catalizador de Oxidación (OC).** La Figura 2 muestra la selectividad de reacción calculada por el modelo para el catalizador Pt-OC en dos posiciones axiales y para 0, 500 y 8 000 ppm de $H_2$, información inaccesible desde el experimento y que constituye el aporte diferencial del modelo.

En la sección de entrada (Figuras 2a y 2b), a tan solo 500 ppm de $H_2$ la selectividad del CO hacia ·OH supera el 90 % por debajo de 120 °C, mientras que sin $H_2$ domina la oxidación con $O_2$ en todo el rango. Esto confirma que la reducción de la temperatura de light-off no se debe al calor de oxidación del $H_2$, sino a la disponibilidad de radicales ·OH donde la concentración de CO es máxima y la inhibición superficial más severa.

En la zona media (Figuras 2c y 2d), a 8 000 ppm la selectividad hacia ·OH cae abruptamente a ~160 °C en el Pt-OC porque el $H_2$ se consume mayoritariamente en la entrada,

reduciendo significativamente la disponibilidad de ·OH aguas abajo [2]. La validación del modelo frente a los datos experimentales del SGB arroja un error medio inferior a 8 ppm en las concentraciones de CO y HC a la salida del monolito en todo el rango de temperatura ensayado [2].

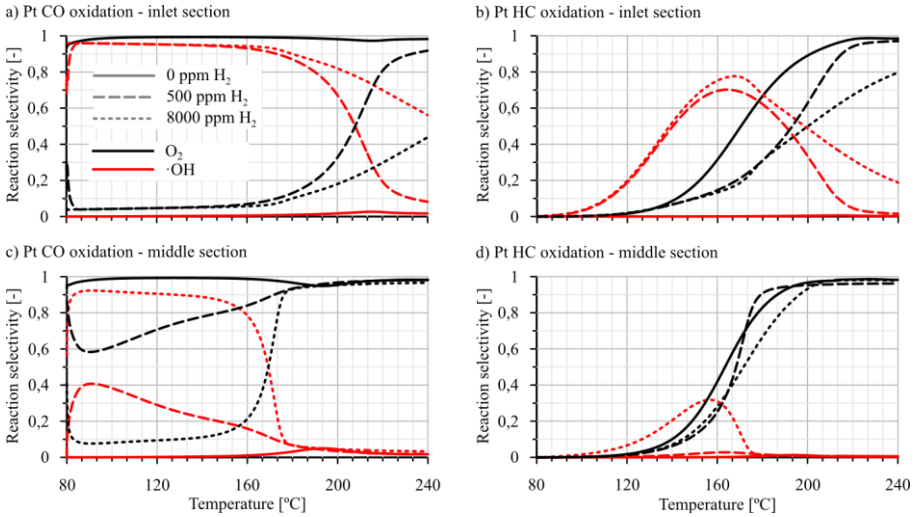



**Figura 2.** Selectividad de reacción del CO (a, c) y HC (b, d) hacia $O_2$ (negro) y ·OH (rojo) en la sección de entrada (arriba) y zona media (abajo) del Pt-OC. Adaptado de [2].

**Catalizador de Tres Vías (TWC).** El segundo ejemplo extiende la aplicación a condiciones propias de motores de combustión estequiométricas (λ = 0,995 y λ = 1,0) con $H_2$ inyectado (0, 250 y 500 ppm), representativas de escenarios donde el $H_2$ llega al TWC bien como residuo de la combustión o bien por reacciones que ocurren in situ. La Figura 3 muestra la formación de $NH_3$ (izquierda) y $N_2O$ (derecha) a la salida del catalizador en función de la temperatura para los seis casos.

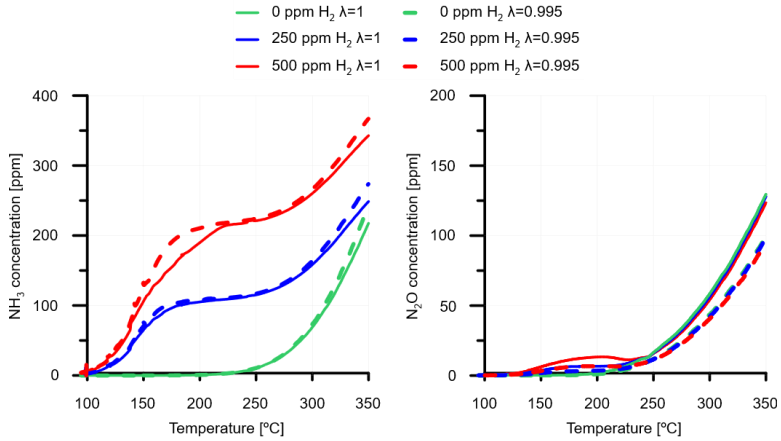



**Figura 3**. Concentración de $NH_3$ (izquierda) y $N_2O$ (derecha) a la salida del TWC en función de la temperatura para diferentes dosados y concentraciones de $H_2$. Adaptado de [3].

Los resultados revelan un comportamiento doblemente asimétrico. Respecto al $NH_3$: el aumento de $H_2$ desde 0 hasta 500 ppm adelanta su aparición de ~250 °C a ~130 °C y eleva las concentraciones finales hasta valores cercanos a 350 ppm a 350 °C para λ rico, frente a menos de 100 ppm sin $H_2$ añadido. El efecto de λ es consistente: el caso λ = 0,995 supera ligeramente al de λ = 1 para las mismas condiciones de $H_2$. El modelo identifica que la causa es la mayor disponibilidad de CO en la condición rica, que permite generar $H_2$ in situ, añadido al $H_2$ presente en el gas de escape.

Respecto al $N_2O$, el comportamiento es opuesto: la concentración de $H_2$ tiene un impacto muy limitado, mientras que λ sí tiene efecto. El modelo explica esta asimetría a través de los términos de inhibición de la vía NO–CO: bajo λ rico, el exceso de CO en el washcoat bloquea competitivamente los sitios de formación de $N_2O$ antes de que la ruta NO–$H_2$ pueda activarse [3]. La comparación modelo-experimento sobre los perfiles de $NH_3$ y $N_2O$ reproduce la tendencia y los valores de pico con un error relativo medio inferior al 12 % en todo el rango de dosado y temperatura considerado [3].

**Catalizador $H_2$-SCR.** El tercer ejemplo aplica a la reducción selectiva con hidrógeno. La Tabla 1 recoge el mecanismo de reacción implementado en el modelo para el catalizador $Pd/TiO_2–Al_2O_3$ ensayado en el SGB. Su característica diferencial respecto a los mecanismos del OC y el TWC es la inclusión explícita de intermediarios superficiales nitrogenados (N*, NH*, $NH_2$*, $NH_3$*) que permiten reproducir la competencia entre las rutas hacia $N_2$ (deseada) y $N_2O$ (indeseable) en función de la temperatura y la cobertura de H*.

**Tabla 1.** Mecanismo de reacción del $H_2$-SCR sobre sitios metálicos M.

| Reacciones R1–R14 | Reacciones R15–R28 |
|---|---|
| Adsorción / Desorción | Oxidación de $NH_3$* |
| **R1** $H_2 + 2S_m \rightleftharpoons 2H^*M$ | **R15** $2NH_3^*M + 3O^*M \rightarrow N_2 + 3H_2O + 5S_m$ |
| **R2** $O_2 + 2S_m \rightleftharpoons 2O^*M$ | **R16** $2NH_3^*M + 4O^*M \rightarrow N_2O + 3H_2O + 6S_m$ |
| **R3** $NH_3 + S_m \rightleftharpoons NH_3^*M$ | **R17** $2NH_3^*M + 5O^*M \rightarrow 2NO + 3H_2O + 7S_m$ |
| Activación de NO (Eley–Rideal) | Redox $NO/NO_2$ |
| **R7** $NO + H^*M \rightarrow N^*M + OH^*M$ | **R18** $NO + ½O_2 \rightleftharpoons NO_2$ |
| Recombinación de N* y formación de $N_2O$ | Reacciones adicionales de N* |
| **R8** $2N^*M \rightarrow N_2 + 2S_m$ | **R20** $N^*M + OH^*M \rightarrow NO + H^*M + S_m$ |
| **R9** $2N^*M + O^*M \rightarrow N_2O + 3S_m$ | **R21** $N^*M + NO_2 \rightarrow 2NO + S_m$ |
| Hidrogenación secuencial sobre M | **R22** $N^*M + NO \rightarrow N_2O + S_m$ |
| **R10** $N^*M + H^*M \rightarrow NH^*M + S_m$ | **R23** $N^*M + NO_2 \rightarrow N_2O + O^*M$ |
| **R11** $NH^*M + H^*M \rightarrow NH_2^*M + S_m$ | Oxidación de CO y HC vía OH* |
| **R12** $NH_2^*M + H^*M \rightarrow NH_3^*M + S_m$ | **R24** $2OH^*M + CO \rightarrow H_2O + CO_2 + 2S_m$ |
| Formación de OH* y agua | **R25** $C_nH_m + (2n+m/2)OH^*M \rightarrow nCO_2 + (m/2)H_2O + (2n+m/2)S_m$ |
| **R13** $O^*M + H^*M \rightarrow OH^*M + S_m$ | Oxidación en fase gas |
| **R14** $OH^*M + H^*M \rightarrow H_2O + 2S_m$ | **R26** $H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O$ |
| | **R27** $CO + ½O_2 \rightarrow CO_2$ |
| | **R28** $C_nH_m + (n+m/4)O_2 \rightarrow nCO_2 + (m/2)H_2O$ |

El mecanismo de la Tabla 1 refleja el mecanismo completo del modelo. Las reacciones de adsorción (R1–R6) establecen el balance de sitios superficiales libres y el acoplamiento entre la disponibilidad de H* y O*. La activación de NO por mecanismo Eley–Rideal (R7) es el paso generador del intermediario N* cuya distribución entre rutas hacia $N_2$ (R8), $N_2O$ (R9, R22, R23) y la cadena de hidrogenación (R10–R12) determina la selectividad global. La formación de OH* (R13–R14) cierra el balance de H* y compite directamente con R7 por los sitios de H*. Los resultados preliminares establecen que la competencia H*→N* versus H*→OH* es el mecanismo que explica por qué la conversión de $NO_x$ no crece linealmente con la concentración de $H_2$ y añadir más $H_2$ solo incrementa la oxidación directa (R26).

## CONCLUSIONES

El tándem SGB–modelo de orden reducido es una herramienta eficaz para la evaluación sistemática del efecto del $H_2$ en sistemas de postratamiento: el banco aporta datos de composición controlada inaccesibles en banco de motor, y el modelo interpreta esos datos, desacopla mecanismos concurrentes y extiende las predicciones a condiciones reales. La solución explícita 1D del modelo permite la ejecución en tiempo real con alta precisión lo que lo hace viable para tareas de prediseño de ATS y para su integración en estrategias de control predictivo embarcado de la inyección de $H_2$. Los tres ejemplos de aplicación muestran la enorme influencia del $H_2$ sobre la reactividad al abrir nuevas vías de reacción: opera vía radicales ·OH en el OC, genera un efecto en la generación de $NH_3$/$N_2O$ y determina la ventana óptima de operación $N^* \rightarrow N_2$ en el $H_2$-SCR a través del balance de cobertura H*–N*. Cabe señalar que el modelo opera bajo hipótesis simplificadoras (flujo incompresible, gradiente radial de temperatura despreciable y propiedades de entrada uniformes en la sección transversal) cuya validez puede verse limitada en condiciones extremas de alta velocidad espacial o gradientes térmicos pronunciados, aspectos que se abordarán en trabajos futuros.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la ayuda PID2023-146449OB-I00, financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER. Adicionalmente, el estudiante de doctorado Sebastian Noriega también ha sido financiado mediante una ayuda de la Universitat Politècnica de València, España, con referencia FPI (PAID-01-25).

## REFERENCIAS

[1] Gatts, T. et al. (2010). An experimental investigation of $H_2$ emissions of a heavy-duty diesel engine supplemented with $H_2$. *Int. J. Hydrogen Energy*, 35(20), 11349–11356. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.056

[2] Piqueras, P., Sanchis, E.J., Conde, C., Herreros, J.M., Tsolakis, A. (2025). Role of $H_2$ in CO and HC conversion by automotive oxidation catalysts under real-world driving conditions. *Int. J. Hydrogen Energy,* 105, 100–115. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.121

[3] Piqueras, P., García Afonso, O., de la Morena, J., Sanchis, E.J. (2026). Understanding the generation characteristics of $NH_3$ and $N_2O$ in three-way catalysts for stoichiometric LPG engines. *Process Saf. Environ. Prot*., 108291. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108291

[4] Piqueras, P., Pla, B., Sanchis, E.J., García, E. (2023). Control-oriented reduced-order modeling of conversion efficiency in dual-layer washcoat catalysts. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 145(10), 101002. https://doi.org/10.1115/1.4062815

# Estudio de la distribución local de corriente y agotamiento de oxígeno en PEMFCs mediante modelado de orden reducido

**Lalangui, José A.[(1)], de la Morena, Joaquín[(1)], Sanchis, Enrique J.[(1)*], Piqueras, Pedro[(1)]**

*(1) CMT-Clean Mobility & Thermofluids, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. *Email: ensanpac@mot.upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de orden reducido 1+1D con resolución axial explícita orientado al control de pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC). El foco principal es la predicción local y en tiempo real de las condiciones de agotamiento de oxígeno (*oxygen starvation*), un fenómeno crítico para la durabilidad del stack. Para capturar este comportamiento en la zona distal del canal sin perder la naturaleza explícita del modelo, se ha integrado la adsorción de oxígeno mediante una isoterma de Frumkin linealizada. Gracias a su formulación matemática, el modelo es capaz de ejecutarse más rápido que en tiempo real, lo que permite su integración directa en plataformas de control embarcado. La herramienta se ha validado, en primer lugar, frente a los resultados experimentales de un banco de ensayos de celda única desarrollado en nuestro laboratorio en condiciones de alta estequiometría y, en segundo lugar, frente a datos de la literatura con distribución local de densidades de corriente en condiciones de baja estequiometría de $O_2$. El modelo reproduce con precisión la caída anómala de corriente en la zona de salida del canal, demostrando una capacidad predictiva local que la cinética lineal convencional no puede capturar.

**Palabras clave:** PEMFC de hidrógeno, banco de ensayos, modelo de orden reducido, distribución axial de corriente, agotamiento de oxígeno, isoterma de Frumkin.

## INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) de hidrógeno son una alternativa a los motores de combustión interna con capacidad para reducir las emisiones de GEI en el sector del transporte, particularmente cuando se emplea hidrógeno renovable [1]. Su comportamiento electroquímico se caracteriza mediante la curva de polarización, que describe tres regiones diferenciadas según el mecanismo de pérdida dominante: pérdidas de activación a voltaje elevado, pérdidas óhmicas asociadas a la resistencia al transporte de protones en la membrana, y pérdidas de concentración a bajo voltaje por limitación de transporte de reactivos [2]. La durabilidad del stack es uno de los retos principales para su implantación masiva; varios mecanismos de degradación, entre ellos el agotamiento local de oxígeno en el cátodo (*oxygen starvation*), se agravan con la operación dinámica [3].

Las estrategias de control evitan el agotamiento operando a altas estequiometrías de cátodo, pero ello penaliza la eficiencia del balance de planta, especialmente en arquitecturas con compresor centrífugo donde el consumo auxiliar crece con el caudal. Los modelos 0D empleados habitualmente en plataformas de control asumen distribución uniforme de especies en el canal y no pueden detectar gradientes axiales de concentración de $O_2$. Los modelos CFD tridimensionales resuelven la distribución

local con alta fidelidad, pero su coste computacional los hace incompatibles con aplicaciones embarcadas [2].

Los modelos de orden reducido con resolución axial 1+1D ofrecen un equilibrio entre estas dos opciones: resuelven perfiles en la dirección del canal y promedian en la dirección transversal de cada capa de la MEA. La novedad del modelo presentado por Piqueras *et al.* [2] respecto a trabajos anteriores [4,5] radica en la solución explícita de las ecuaciones de conservación, que evita métodos iterativos y permite la ejecución más rápida que en tiempo real. Un aspecto adicional que los modelos de control orientado suelen omitir es la adsorción de $O_2$ en la superficie del platino: a bajas concentraciones, la ocupación de los sitios activos introduce una no linealidad que es responsable de la caída de corriente observada en la zona distal del canal bajo condiciones de agotamiento [6].

En este contexto, el presente trabajo presenta el banco de ensayos de monocelda del CMT-Clean Mobility & Thermofluids de la UPV y el modelo 1+1D desarrollado por Piqueras *et al.* [2], extendido con la isoterma de Frumkin linealizada para la cinética del cátodo [6]. Se muestran los primeros resultados experimentales del banco a alta estequiometría de cátodo y su comparación con datos de distribución local de corriente de la literatura en condiciones de agotamiento severo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque metodológico de este trabajo sitúa como eje central el desarrollo del modelo de orden reducido 1+1D. No obstante, la robustez de una herramienta numérica orientada al control depende críticamente de su proceso de validación. En este sentido, resulta conveniente y necesario contrastar las predicciones del modelo numérico tanto a nivel global como local. Por un lado, se recurre a bases de datos consolidadas de la literatura para evaluar la precisión del modelo ante gradientes locales severos de densidad de corriente, cuya medición directa es compleja. Por otro lado, el estudio se beneficia de una infraestructura experimental propia: un banco de ensayos avanzado desarrollado en el CMT-UPV diseñado específicamente para la caracterización físico-química y electroquímica de monoceldas. Esta instalación no solo permite contextualizar operativamente el modelo, sino que proporciona un conjunto de datos experimentales propios y directos para su calibración y validación en regímenes operativos reales. Como referencia de los elementos involucrados en esta metodología, la Figura 1 detalla tanto el despiece físico de la monocelda ensayada como el esquema del banco de gases empleado en nuestro laboratorio.

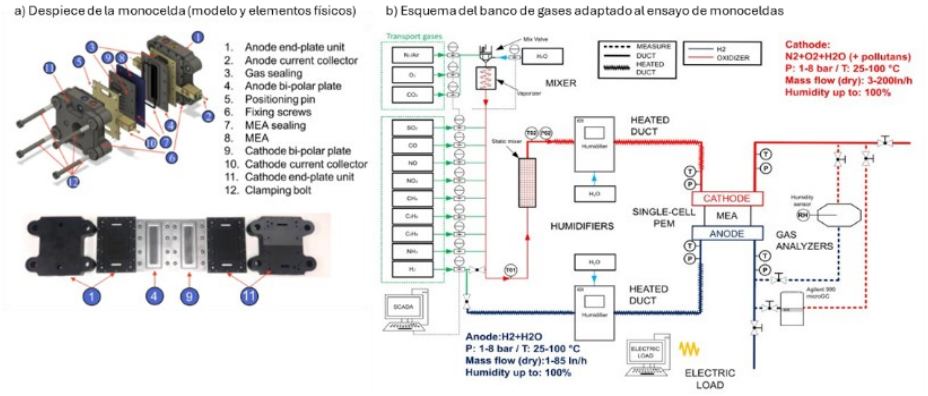



**Figura 1.** Despiece de la monocelda (a) y esquema del banco de ensayos (b).

El banco dispone de alimentación controlada de $H_2$, $O_2$, $N_2$ y $H_2O$ mediante caudalímetros Coriolis gestionados por SCADA, líneas calefactadas y dos humidificadores de membrana, uno por electrodo. Los sensores de presión y temperatura en la entrada y salida de cada electrodo, junto con un analizador de gases Agilent 990 microGC, permiten caracterizar el estado del sistema con detalle. La carga eléctrica se controla mediante una fuente de alimentación complementada con bancos de resistencias en paralelo para alcanzar altas densidades de corriente. El rango operativo abarca presiones de 1-8 bar, temperaturas de 25-100 ºC y caudales de hasta 200 ln/h en el cátodo, con humedad relativa controlable hasta el 100%.

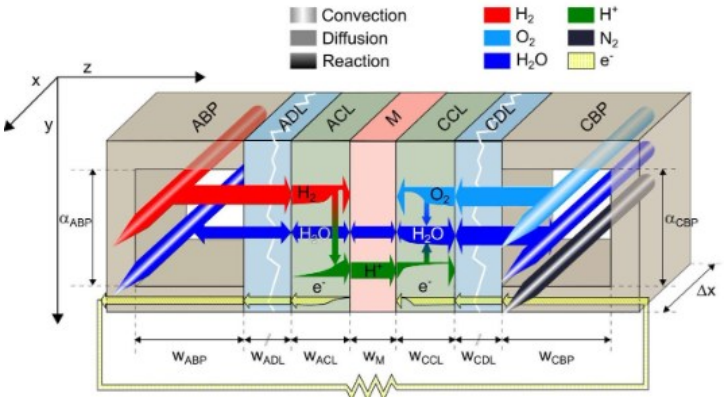



**Figura 2**. Esquema 3D del modelo: capas de la MEA, fenómenos de convección, difusión y reacción, y flujos de especies a lo largo del volumen de control. Adaptado de [2].

Una vez descrita la instalación empleada para realizar ensayos de validación, se describe a continuación el núcleo del trabajo: el modelo de orden reducido. El modelo de orden reducido resuelve un canal representativo de la placa bipolar dividido en N volúmenes de control en la dirección axial (x), con valores promediados en la dirección transversal para cada capa de la MEA: placa bipolar (BP), capa de difusión de gas (DL), capa catalítica (CL) y membrana (M).

La Figura 2 ilustra la arquitectura del modelo y los fenómenos físico-químicos contemplados. Antes de abordar su formulación matemática, es esencial describir el principio físico de operación que el modelo reproduce a lo largo de este dominio transversal:

- Ánodo: El hidrógeno entra por convección a lo largo del canal del ánodo (ABP) hasta alcanzar la capa catalítica (ACL), donde tiene lugar la reacción de oxidación de hidrógeno, que descompone cada molécula en protones ($H^+$) y electrones ($e^-$).
- Membrana: Los protones cruzan la membrana (M) hacia el cátodo arrastrando consigo moléculas de agua por efecto electroosmótico.
- Cátodo: En el lado catódico el $O_2$ reacciona con los protones que cruzaron la membrana y los electrones del circuito externo, generando calor y agua ($H_2O$). El agua generada se evacúa por difusión hacia ambos canales o se redistribuye por retrodifusión.

El submodelo de transporte de masa y reacción resuelve la evolución axial de las concentraciones de especies ($H_2$, $O_2$, $H_2O$) a lo largo del canal, acoplando el transporte difusivo desde el canal hasta la capa catalítica con la cinética electroquímica local. La linealización de la cinética de Butler-Volmer permite obtener una solución analítica

explícita en cada volumen de control, eliminando la necesidad de iteraciones. En el cátodo, el efecto de bloqueo de sitios activos de platino por oxígeno adsorbido se incorpora mediante una cobertura superficial efectiva basada en la isoterma de Frumkin, sin alterar la estructura explícita del modelo [6].

El submodelo de balance de carga representa cada electrodo como un circuito RC equivalente y actualiza explícitamente los sobrepotenciales de ánodo y cátodo en cada paso de tiempo a partir de la corriente de celda y los consumos molares calculados por el submodelo anterior. Las pérdidas óhmicas en membrana se obtienen por balance de tensiones. El submodelo de gestión del agua actualiza el contenido de agua en cada capa catalítica integrando la generación electroquímica, el arrastre electroosmótico y la retrodifusión entre electrodos. Cuando la fracción de vapor supera la saturación, determina la cantidad de agua líquida, cuya presencia reduce la porosidad efectiva y limita el acceso de $O_2$ a la capa catalítica. El submodelo de membrana calcula el flujo protónico a partir de la conductividad iónica de la membrana, que depende de su contenido en agua y de la temperatura. Recibe los perfiles de hidratación del submodelo de gestión del agua y devuelve el flujo protónico al de balance de carga, cerrando el acoplamiento entre submodelos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación del modelo se articula en dos bloques. El primero se centra en alta estequiometría de cátodo, combinando datos experimentales del banco del CMT-UPV con los resultados de referencia de Mangold *et al.* [4]. Los ensayos propios emplean una celda de 25 $cm^2$ operada a humidificación completa, 70 ºC y 1,5 bar, condiciones que permiten validar el comportamiento base del modelo en un régimen libre de limitaciones por transporte de masa de $O_2$. El segundo bloque aborda la validación en condiciones críticas mediante los datos de Mench *et al.* [8] bajo fenómenos de *oxygen starvation.*

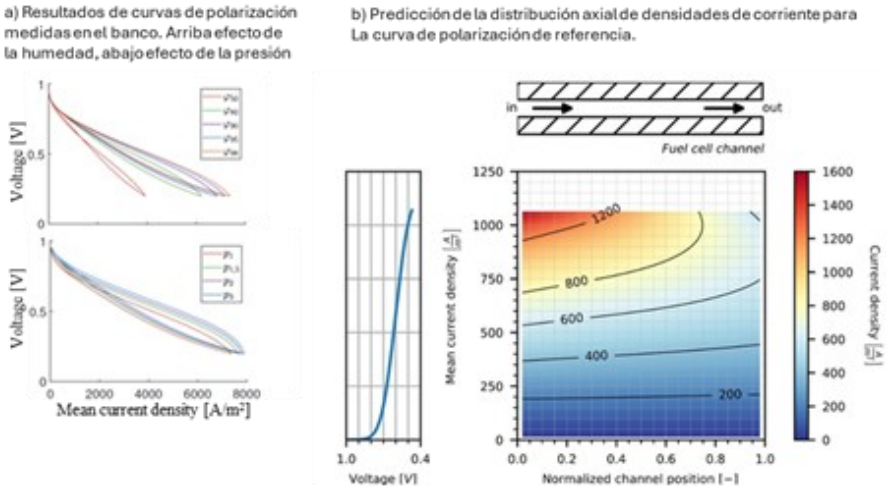



**Figura 3.** (a) Curva de polarización experimental del banco CMT-UPV. (b) Distribución axial de densidad de corriente local predicha por el modelo a alta estequiometría de cátodo adaptado de [2] y [7]).

La Figura 3a recoge las curvas de polarización del banco, evaluando paramétricamente el impacto de la humedad relativa (gráfico superior) y la presión operativa (gráfico inferior). En todos los casos se observa una histéresis apreciable entre el barrido de bajada y el de subida, más pronunciada a altas densidades de corriente. Este

comportamiento responde a la dinámica transitoria del agua en la membrana y a los efectos térmicos acoplados: durante el descenso de voltaje, el agua generada hidrata progresivamente el polímero mejorando su conductividad protónica; en el barrido de retorno, la desorción y evacuación del agua es más lenta que la recuperación del voltaje, condicionada por la inercia térmica de la celda. El modelo actual reproduce con fidelidad las tendencias asociadas a variaciones de presión y humedad, pero la captura del bucle de histéresis se establece como trabajo futuro [7], por lo que la validación presentada emplea únicamente las curvas de bajada.

La Figura 3b muestra la distribución axial de densidad de corriente predicha para las condiciones de Mangold *et al.* [4]. A altos potenciales la distribución es prácticamente homogénea; a densidades de corriente media superiores se manifiesta la limitación por transporte de masa, con valores locales en la entrada hasta el doble de los de la zona distal. La solución explícita permite ejecutar el modelo más de 2,4 veces más rápido que el tiempo real con tan solo 10 volúmenes de control [2].

Actualmente se está trabajando en extender los ensayos realizados en el banco hacia menores estequiometrías de cátodo. Sin embargo, el banco no dispone de instrumentación para medir la distribución local de corriente a lo largo del canal; además, la introducción de resistencias de derivación o placas segmentadas para obtener esa información puede alterar las condiciones de contacto eléctrico y de flujo, desvirtuando la curva de polarización global. Por ello, un enfoque híbrido resulta más adecuado: combinar la medida experimental de prestaciones globales en el banco con la simulación de los efectos locales mediante un modelo correctamente calibrado. Para validar el modelo en condiciones de agotamiento severo se utilizan los datos de Mench *et al.* [8], obtenidos con una celda de 50 $cm^2$ instrumentada con resistencias de derivación en 11 posiciones axiales.

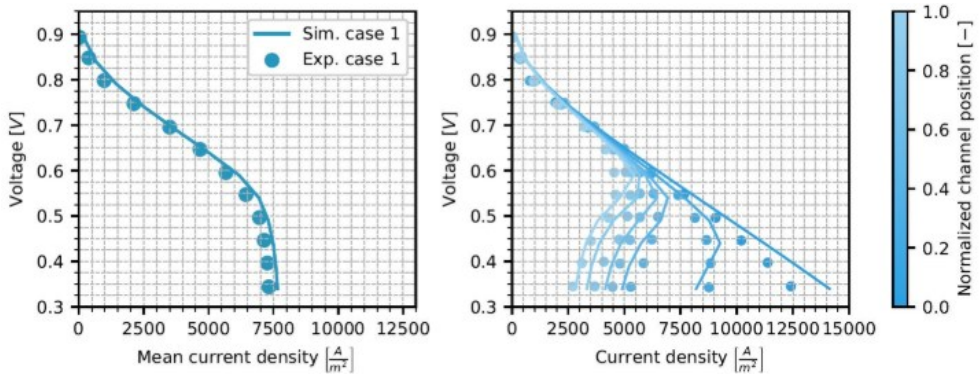



**Figura 4.** Curva de polarización global (izquierda) y curvas locales de densidad de corriente por posición en el canal (derecha) para la estequiometría más baja. Adaptado de [6].

La Figura 4 muestra la capacidad del modelo para reproducir el escenario de menor estequiometría (11 250 $A/m^2$) de Mench *et al.* [8], con la curva de polarización global (izquierda) y las curvas locales de densidad de corriente frente al voltaje (derecha), coloreadas según posición axial. La respuesta global es fielmente reproducida en todo el rango operativo. Localmente, en la zona de entrada (tonos oscuros) la corriente aumenta de forma monótona al reducir el voltaje; en la zona distal (tonos claros) los perfiles muestran una inversión en forma de "S" a partir de 0,55 V, consecuencia del agotamiento progresivo de $O_2$ y del bloqueo de sitios activos de platino por debajo de un umbral crítico de concentración. Una formulación convencional de Butler-Volmer es incapaz de reproducir esta inversión; la isoterma de Frumkin resulta imprescindible bajo estas condiciones extremas.

A 0,45 V, la densidad de corriente local en la entrada supera en más del doble el valor promedio, mientras que en la zona distal cae por debajo del 30% de dicha media. Predecir estos gradientes con precisión espacial y en tiempo inferior al real convierte al modelo en una herramienta preventiva capaz de optimizar el caudal del compresor antes de alcanzar condiciones de daño irreversible.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El modelo propuesto combina velocidad de cómputo (2,4× tiempo real con 10 volúmenes de control) y resolución espacial distribuida, lo que lo hace apto para control predictivo embarcado. Su aportación principal es la cuantificación de la estratificación axial de densidad de corriente bajo baja estequiometría catódica: la corriente local en la entrada supera el doble del valor medio, mientras que en la zona distal cae por debajo del 30%. Esta no-uniformidad, inaccesible a modelos 0D, permite diferenciar mecanismos de degradación según la posición axial. La sustitución de Butler-Volmer por la isoterma de Frumkin linealizada resuelve el problema de inversión local de corriente sin ajustes dependientes del voltaje, e identifica el bloqueo de sitios activos de Pt por oxígeno adsorbido como mecanismo dominante por debajo de 0,55 V. La validación combina datos de literatura con ensayos propios en el banco de celda única del CMT-UPV, donde se caracterizó la histéresis electroquímica asociada a la dinámica de hidratación de membrana, fenómeno que se incorporará en versiones extendidas del modelo.

## REFERENCIAS

[1] Wallnofer-Ogris, *et al.* (2024). “Main degradation mechanisms of PEMFC stacks”. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 50, p.p. 1159–1182. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.215

[2] Piqueras, Pedro, *et al.* (2026). “Development and validation of a reduced-order control-oriented model for hydrogen PEMFC”. *Energy Conversion and Management*, v. 348, p.p. 120788. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120788

[3] Fan, Linhao, *et al.* (2017). “Characteristics of PEMFC operation at high current density with low external humidification”. *Energy Conversion and Management*, v. 150, p.p. 763–774. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.034

[4] Mangold, Michael, *et al.* (2010). “Passivity based control of a distributed PEM fuel cell model”. *Journal of Process Control,* v. 20, p.p. 292–313. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.11.008

[5] Miotti, Alessandro, *et al.* (2005). "Control-oriented model for an automotive PEM fuel cell system with imbedded 1+1D membrane water transport". En 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, p.p. 8.

[6] Lalangui, Jose A. *et al.* (2026). “Enhancing PEMFC models using Frumkin-type adsorption isotherm for accurate oxygen depletion prediction”. *Journal of Power Sources*, (under review).

[7] Sierra Campos, Paula. (2026). “Simulación con modelo térmico 3D acoplado a modelo físico-químico 1D+1D en pilas de combustible”. TFM, Universitat Politècnica de València.

[8] Mench, M.M. *et al.* (2003). “In situ current distribution measurements in polymer electrolyte fuel cells”. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 150, n. 8, p.p. A1052–A1059. 10.1149/1.1584440

# Estado del arte: Barreras en la adopción del algodón reciclado mecánicamente

**Mira-Cuenca, Cristina[(1)], Almuhamed, Sliman[(2)], Micó-Vicent, Bàrbara[(3)] López-Rodriguez, Daniel[(4)] Jordán-Núñez, Jorge[(3)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, crimicue@edu.upv.es*

*(2) Recover Textile Systems S.L. sliman.almuhamed@recoverfiber.com*

*(3) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(4) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

## RESUMEN

El reciclaje mecánico del algodón se posiciona como una de las principales estrategias para avanzar hacia un modelo textil circular, al ser el único proceso capaz de recuperar fibras celulósicas manteniendo su naturaleza original. Sin embargo, su adopción industrial sigue siendo limitada debido a diversas barreras técnicas, económicas y de trazabilidad. Este trabajo presenta un análisis del estado del arte sobre la adopción del algodón reciclado mecánicamente, basado en una revisión sistemática de literatura científica reciente.

Los resultados evidencian que, aunque el reciclaje mecánico presenta ventajas operativas y de escalabilidad, la degradación de las propiedades de la fibra (longitud, neps e hilos sin abrir) continúa siendo el principal obstáculo para su uso en aplicaciones de alto valor añadido. Asimismo, se identifican limitaciones asociadas a la presencia de contaminantes como pueden ser, otras fibras, o colorantes.

Este estudio contribuye a definir las principales barreras y oportunidades del algodón reciclado, proporcionando una base para el desarrollo de estrategias que impulsen su adopción industrial.

**Palabras clave:** algodón; reciclado mecánico; proceso industrial; fibras recicladas; sostenibilidad; residuos textiles.

## INTRODUCCIÓN

La industria textil se enfrenta a un desafío crítico derivado del crecimiento sostenido en la producción de fibras y la consecuente generación de residuos. En este contexto, el algodón representa una de las fibras más relevantes a nivel global, tanto por su volumen de producción como por su impacto ambiental. A pesar del avance en iniciativas sostenibles, la proporción de algodón reciclado sigue siendo limitada, representando una fracción mínima del mercado total.

Adicionalmente, la creciente complejidad de los residuos textiles, especialmente en flujos post-consumo, introduce desafíos adicionales relacionados con la clasificación, la variabilidad de composiciones y la presencia de acabados químicos. Estas dificultades se ven reforzadas por la falta de estandarización en los procesos industriales y la limitada disponibilidad de infraestructuras especializadas.

Paralelamente, el marco regulatorio europeo está evolucionando hacia modelos que exigen mayor transparencia y trazabilidad en la cadena de valor textil, lo que introduce nuevas exigencias para la validación del contenido reciclado en los productos.

En este contexto, resulta necesario analizar de forma estructurada las barreras que limitan la adopción del algodón reciclado mecánicamente, con el fin de identificar oportunidades de mejora y orientar futuras líneas de investigación.

## OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es analizar cuáles son las principales barreras que limitan la adopción industrial del algodón reciclado mecánicamente e identificar oportunidades de mejora desde una perspectiva técnica e industrial.

**Objetivos específicos:**

1. Evaluar la situación actual del reciclaje mecánico de algodón en el sector textil.
2. Analizar las limitaciones técnicas de las fibras recicladas y su impacto en el procesado y producto final.
3. Revisar las estrategias actuales orientadas a la mejora de la calidad del algodón reciclado.
4. Detectar lagunas en la investigación actual y proponer nuevas líneas de desarrollo.

## MÉTODOS

Para la revisión de la literatura se han usado las principales plataformas científicas, como Scopus o Google Scholar, filtrando artículos recientes (2010-2026) relacionados con el reciclaje mecánico de los residuos textiles de algodón, post-industriales (desechos de hilatura y tejeduría) y post-consumo, además de reportes de algunas de las organizaciones más relevantes para la industria.

## RESULTADOS

### Situación actual del reciclaje mecánico de algodón en el sector textil

El mercado mundial de las fibras textiles sigue creciendo anualmente, situándose en 2024 en 132 millones de toneladas y con una proyección de 169 millones para el 2030 de continuar esta tendencia. Estos números están protagonizados por las fibras sintéticas, principalmente por la producción de polyester, que ocupa un 59% de la producción. Por otro lado, las fibras de algodón ocupan el segundo puesto, con un 19% de la producción total, y ya en tercer lugar diversos tipos de fibras ocupan el mismo porcentaje, un 5%, para la producción de viscosa o poliamida, del porcentaje de producción global [1].

Estos números incluyen la producción tanto de fibras vírgenes como recicladas, siendo las segundas de apenas un 7.6% de la producción total y tratándose en su mayoría de poliéster reciclado a partir de botellas.

En el caso de algodón, a pesar de sufrir una ligera disminución en la producción global, aumentó la adopción de programas sostenibles como el uso de algodón orgánico o el

Better Cotton Initiative (BCI), representando un 23% del algodón producido en 2023/24. También aumentó la producción de algodón reciclado pre y post-consumo, siendo, aun así, de tan solo un 1% del mercado global de algodón, con 0,3 millones de toneladas en 2024.

En este punto hay que destacar el proceso de reciclaje mecánico como el único capaz de convertir los residuos textiles de algodón en fibras de algodón de nuevo. Además de ser uno de los más implementados debido a sencillez operativa, su rentabilidad y su compatibilidad con una amplia variedad de flujos de residuos textiles. Sin embargo, en este punto cabe diferenciar entre dos enfoques:

- El reciclaje de ciclo abierto (open-loop), actualmente la tecnología predominante, que transforma los residuos textiles en otros productos industriales en lugar de volver a convertirlos en fibras textiles.
- El reciclaje de fibra a fibra (close-loop) se está convirtiendo en algo esencial, ya que permite destinar los productos reciclados a sus mismos productos de origen permitiendo cerrar el círculo.

A pesar del crecimiento sostenido de la producción textil global, el porcentaje de fibras recicladas sigue siendo reducido y está claramente dominado por el poliéster reciclado. Este desequilibrio evidencia que, en términos de adopción industrial, las soluciones basadas en reciclaje mecánico de algodón no han logrado competir en escalabilidad ni en eficiencia económica frente a alternativas sintéticas.

En el caso específico del algodón reciclado, su limitada penetración (1%) no solo refleja restricciones tecnológicas, sino también una falta de incentivos industriales claros para su integración en cadenas de valor consolidadas.

## Características y limitaciones técnicas de las fibras de algodón reciclado

Uno de los principales problemas de las fibras de algodón reciclado es la degradación que sufren las fibras durante el proceso mecánico, dando lugar a fibras de menor longitud, resistencia y finura en comparación con las fibras de algodón virgen [2].

Esto es causado no solo por la agresividad del procesado mecánico sino también por la naturaleza de los residuos textiles, mayoritariamente tejidos que han sido sometidos a procesos químicos de preparación y tintura, degradando así las fibras de algodón que los forman. También influye la segregación de los residuos, sobre todo en el caso de los residuos post-consumo, donde las diferentes composiciones o estructuras complican la optimización del proceso de reciclado. No solo eso, el hecho de que los residuos estén coloreados se traduce en fibras recicladas de color, complicando su aplicación en procesos posteriores, debido a la contaminación de las líneas de hilatura destinadas a procesar algodón virgen, o por la limitación de los productos finales a los que se pueda destinar [3].

Por otra parte, las fibras de algodón reciclado destacan por poseer características que no se encuentran en las fibras de algodón virgen, como la presencia de material fibroso que no ha podido ser convertido en fibras durante el reciclado, denominados hilos sin abrir, o una mayor presencia de neps en comparación con la fibra virgen.

Para compensar las propiedades de las fibras de algodón recicladas, éstas se mezclan generalmente con algodón virgen para mezclas celulósicas, o polyester para otras mezclas, lo que favorece el procesado industrial. A pesar de la mezcla, las propiedades de los hilos reciclados también presentan características propias del reciclado, como es una mayor irregularidad, un incremento en las imperfecciones y una menor tenacidad.

De esta forma, la plataforma Uster Statistics, presenta una comparativa en las calidades de los diferentes títulos, según tecnología y composición. La plataforma creada por Uster Technologies [4], compañía de referencia en los equipos de análisis de calidad desde fibra a tejido, contiene una de las mayores bases de datos de calidades de hilo, con diferentes tecnologías, materiales o etapas del proceso. En la Figura 1, se puede observar el valor del percentil 50% para hilos fabricados con algodón virgen 100% (100VCo) y con una mezcla del 70% algodón virgen y 30% algodón reciclado (70/30VCoRCo). Se han escogido 4 de los títulos ingleses (Ne) más usados en el sector moda textil, 20, 26, 30 y 34 Ne.

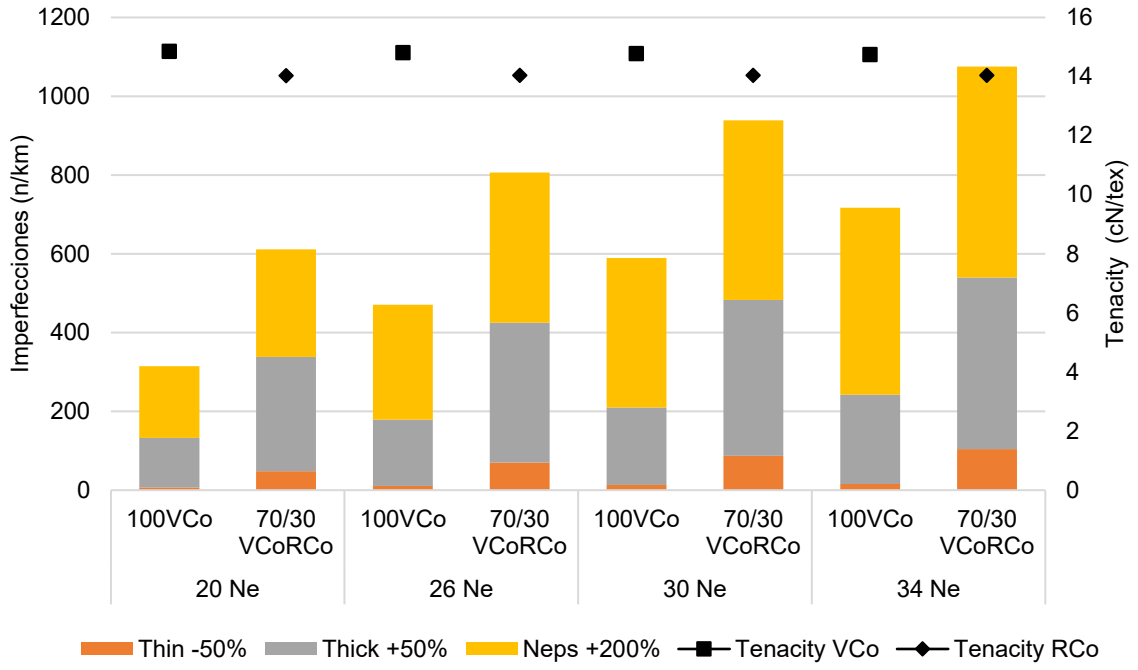



**Figura 1.** Comparativa en la calidad de los hilos en los principales títulos ingleses

La gráfica muestra la presencia de una mayor cantidad de imperfecciones, especialmente puntos gruesos (Thick +50%) y neps de los hilos reciclados frente a los hilos convencionales con algodón virgen. También la tenacidad se ve influenciada, aunque en menos medida, estando siempre por debajo.

La degradación de la fibra se presenta de forma recurrente como la principal limitación del reciclaje mecánico. Sin embargo, este enfoque resulta simplista si no se considera que dicha degradación es, en gran medida, inherente al propio principio del proceso. En consecuencia, las estrategias actuales no eliminan el problema, sino que lo mitigan parcialmente.

Esto plantea una cuestión crítica, si el reciclaje mecánico no puede garantizar propiedades equivalentes al algodón virgen, su viabilidad a largo plazo no solo depende de mejorar la calidad de la fibra, sino de redefinir los estándares de aplicación y aceptación del material reciclado en el mercado, tanto por los hiladores y tejedores, como por las marcas de moda.

### Estrategias actuales para la mejora del algodón reciclado

El estado actual del reciclaje textil refleja una necesidad crítica de desarrollar sistemas escalables y eficientes que garanticen la viabilidad económica de la moda circular. En la Tabla 1, se presentan algunas de las estrategias más recientes que se están estudiando para abordar cada uno de los problemas detallados anteriormente.

**Tabla 1.** Estrategias actuales para mejorar el proceso de adopción de las fibras recicladas

| Problemática | Estrategias actuales |
|---|---|
| Mejora de las propiedades físicas de las fibras recicladas | – Tratamiento con PEG 4000 para disminuir la cohesión entre fibras, reducir la pérdida de longitud de la fibra y facilitar un proceso de desgarro más eficiente [5].<br>– Uso del proceso de peinado para disminuir la cantidad de fibras cortas durante el proceso de hilatura, partiendo de altos % de fibra reciclada y permitiendo obtener hilos peinados de alta calidad con un contenido alto de algodón reciclado [6].<br>– Optimización del proceso mecánico de reciclado [7]. |
| Presencia de hilos sin abrir y neps | – Se presenta una combinación del uso de PEG 4000 y Afilan CFA 100 para permitir una mejor apertura de los residuos textiles, así como la optimización en la preparación de los residuos textiles [8]. |
| Presencia de otras fibras o contaminantes | – Se ha estudiado el uso de disolventes orgánicos como el DMSO, para la eliminación de elastano en tejidos de poliéster/elastano [9]. |
| Residuos textiles coloreados | – Procesos de decoloración mediante hidrólisis usando hidróxido de sodio (NaOH) u oxidación usando peróxido de hidrógeno ($H_2O_2$) [10], ampliamente usado en la industria.<br>– También se ha estudiado el uso del disolvente DMSO para decolorar tejidos de algodón/poliéster [11]. |
| Verificación del uso de fibras recicladas | – Estudio que combina tres métodos de análisis, la microscopía, la medición de la distribución de la longitud de las fibras y el grado de polimerización como indicativo de la presencia de fibras de algodón reciclado [12]. |

A pesar de la diversidad de estrategias propuestas, la mayoría de ellas se centran en optimizar etapas concretas del proceso, y a nivel laboratorio. En este sentido, muchas de las soluciones presentan limitaciones en términos de escalabilidad industrial, coste o impacto ambiental, lo que cuestiona su aplicabilidad real fuera de entornos experimentales.

## CONCLUSIONES

El reciclaje mecánico del algodón presenta un alto potencial dentro de la economía circular, pero su adopción industrial continúa limitada por la degradación inherente de la fibra, la variabilidad de los residuos textiles y la falta de sistemas robustos de

trazabilidad. El análisis evidencia que las estrategias actuales, aunque útiles, no resuelven de manera integral estas limitaciones, lo que refleja una brecha significativa entre la investigación y su aplicación industrial. En este contexto, la viabilidad del algodón reciclado dependerá del desarrollo de enfoques integrados que combinen la mejora del procesado mecánico, la estandarización de la calidad de la fibra y la implementación de herramientas de trazabilidad. Como líneas futuras, se propone avanzar en la optimización del proceso mediante metodologías experimentales, así como en la definición de criterios de calidad adaptados al uso final del material reciclado.

## REFERENCIAS


[1] Textile Exchange (2025). "Materials Market Report 2025". https://textileexchange.org/materials-market-report/

[2] Islam, M. M.; Yin, R.; West, A. (2025). "A Brief Review of Mechanical Recycling of Textile Waste". Textiles, v. 5, n. 4, p.p. 41. https://doi.org/10.3390/textiles5040041

[3] Baloyi, R. B.; Gbadeyan, O. J.; Sithole, B.; Chunilall, V. (2024). "Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review". Textile Research Journal, v. 94, n. 3–4, p.p. 508–529.https://doi.org/10.1177/00405175231210239

[4] Uster Technologies (s.f.). "Uster Technologies". https://www.uster.com

[5] Kanan, M.; Wannassi, B.; Azouz, B.; ben Hassen, M.; Assaf, R.; Barham, A. S. (2024). "Cotton recycling: An experimental study of the mechanical preparation process". Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, v. 10. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100849

[6] Lindström, K.; Sjöblom, T.; Persson, A.; Kadi, N. (2020). "Improving Mechanical Textile Recycling by Lubricant Pre-Treatment to Mitigate Length Loss of Fibers". Sustainability, v. 12, n. 20, p.p. 8706. https://doi.org/10.3390/su12208706

[7] Aslan, Ç.; Eryürük, S. H.; Will, M. (2026). "Enhancing fibre-to-fibre recycling of mechanically recycled cotton through combed compact ring spinning". Waste Management, v. 217, p.p. 115502. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115502

[8] Lindström, K.; van der Holst, F.; Berglin, L.; Persson, A.; Kadi, N. (2024). "Mechanical textile recycling efficiency: Sample configuration, treatment effects and fibre opening assessment". Results in Engineering, v. 24, p.p. 103252. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103252

[9] Boschmeier, E.; Archodoulaki, V.-M.; Schwaighofer, A.; Lendl, B.; Ipsmiller, W.; Bartl, A. (2023). "New separation process for elastane from polyester/elastane and polyamide/elastane textile waste". Resources, Conservation and Recycling, v. 198, p.p. 107215. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107215

[10] Wang, S.; Salmon, S. (2022). "Progress toward Circularity of Polyester and Cotton Textiles". Sustainable Chemistry, v. 3, n. 3, p.p. 376–403. https://doi.org/10.3390/suschem3030024

[11] Sharma, E.; Hardjopranoto, M. K.; Gunawan, P.; Geok Leng, Z. S.; Chor Yong, D. T.; Gupta, N.; Nan, L. Y.; Hu, X. (2025). "Solvent assisted approach for greener decoloration of textile and fashion waste". Cleaner Engineering and Technology, v. 27, p.p. 100990. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100990

[12] Ten Berge, A. B. G. M.; Temmink, R.; Kuppen, M.; van Slagmaat, M. B.; Kamphuis, S.; Groeneveld, R. A. J.; Luiken, A.; Oelerich, J.; Mahy, J. W. G. (2026). "An analytical toolbox to verify the presence, quantity and origin of recycled cotton fibres in textile garments". Scientific Reports, v. 16, n. 1, p.p. 8999. https://doi.org/10.1038/s41598-026-39268-y

# Modelo de madurez institucional para la planificación estratégica en entornos universitarios inclusivos

**De la Torre, Rocio[(1)], Mengual-Recuerda, Ana[(2)], Valencia, Lina E.[(3)]**

*(1) Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de la Producción. Departamento de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València. mrtormar@omp.upv.es*
*(2) Grupo de Investigación en Emprendimiento y Sostenibilidad. Departamento de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València. anmenre1@.upv.es*
*(3) Departamento de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València. levaljim@epsa.upv.es*

## RESUMEN

En un contexto de transformación organizativa impulsado por el marco europeo de inclusión y sostenibilidad definido en el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), este proyecto aborda el reto de dotar a las universidades de herramientas metodológicas para analizar, planificar y avanzar estratégicamente hacia estructuras más inclusivas y sostenibles socialmente. Desde un enfoque sistémico y basado en principios de ingeniería organizacional, se desarrollará un modelo de madurez institucional que permita diagnosticar el grado de desarrollo en inclusión, definir niveles de progreso y apoyar la toma de decisiones mediante indicadores cualitativos y cuantitativos. El proyecto integra análisis comparativo entre universidades, codiseño con agentes clave y validación experta, generando un marco práctico escalable que contribuya a la mejora de la gobernanza y a la planificación estratégica. Los resultados serán transferibles a otras instituciones y se difundirán a través de recursos abiertos, publicaciones y actividades formativas orientadas al impacto institucional y social.

**Palabras clave:** sostenibilidad, universidad, ingeniería organizacional, inclusión, toma de decisiones, planificación estratégica, impacto social, gobernanza.

## INTRODUCCIÓN

La creciente diversificación del estudiantado universitario plantea desafíos estructurales a las universidades, que deben garantizar no solo el acceso, sino también la permanencia y el éxito académico en condiciones de equidad [1]. El aumento de estudiantes con perfiles diversos —por condiciones socioeconómicas, género, discapacidad o dificultades específicas de aprendizaje— exige revisar cómo las instituciones organizan sus recursos y políticas para responder de forma efectiva a esta realidad [2].

En este contexto, las estructuras institucionales de apoyo adquieren un papel estratégico. Lejos de ser dispositivos aislados, deben integrarse en una gobernanza transversal que promueva entornos de aprendizaje accesibles, sostenibles y sensibles a la diversidad.

Sin embargo, la implantación de medidas inclusivas en las universidades continúa siendo desigual, fragmentada y, en muchos casos, desvinculada de los procesos formales de toma de decisiones [3]. Esta desconexión entre las políticas inclusivas y la planificación institucional pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia marcos más coherentes, evaluables y sostenibles. En este sentido, resulta imprescindible contar con

herramientas conceptuales y operativas que permitan analizar de forma sistemática el nivel de desarrollo organizacional en materia de inclusión.

Los modelos de madurez institucional constituyen una de las metodologías más sólidas y versátiles para este propósito. Se trata de marcos analíticos estructurados en niveles progresivos que describen el grado de consolidación de políticas, procesos y estructuras dentro de una organización [4]. A través de indicadores específicos —cualitativos y cuantitativos—, estos modelos permiten diagnosticar la situación actual, identificar brechas, áreas de mejora y establecer itinerarios de evolución realistas hacia escenarios más integrados y eficaces [5]. Aplicados al ámbito de la inclusión universitaria, estos modelos ofrecen la posibilidad de evaluar aspectos clave como la coordinación entre departamentos, la asignación de recursos, la implicación de los actores institucionales o la alineación entre las políticas inclusivas y los objetivos estratégicos de la universidad [6]. Además, permiten comparar el avance entre instituciones y fomentar procesos de aprendizaje mutuo, contribuyendo así a una gestión universitaria más estratégica, basada en evidencia y comprometida con la equidad.

El Plan de la Comisión Europea para la inclusión en la educación superior promueve un Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) más equitativo e inclusivo, defendiendo la igualdad de oportunidades para todos los estudiantes independientemente de su origen, género o situación socioeconómica [7]. Este marco impulsa la incorporación de grupos subrepresentados y la cooperación transnacional entre universidades, legitimando la acción institucional en inclusión y proporcionando una hoja de ruta para transformar las estructuras universitarias desde la justicia social y la sostenibilidad.

Para enfrentar estos retos, el presente artículo introduce el proyecto “Modelo de madurez institucional para la planificación estratégica en entornos universitarios inclusivos (MIPEI)”, financiado por el programa Primeros Proyectos de Investigación de la Universitat Politècnica de València.

El proyecto MIPEI busca la construcción de un modelo de madurez que facilite no solo el diagnóstico de fortalezas y debilidades existentes, sino también la generación de planes de acción orientados a la mejora continua. Este enfoque permitirá una gestión pública más eficiente, al optimizar la utilización de recursos y alinear las prácticas inclusivas con objetivos estratégicos claros y medibles, integrándolos dentro de la gobernanza y la cultura institucional.

A continuación, se exponen los objetivos y los resultados previstos con esta iniciativa. Posteriormente, se ofrece un resumen junto con las conclusiones del proyecto.

## OBJETIVOS

El proyecto MIPEI tiene como meta elaborar un modelo que contribuya a consolidar el compromiso de la universidad con la equidad y el éxito académico de toda la diversidad estudiantil, garantizando que las políticas y estructuras de apoyo se adapten a sus necesidades reales y respondan a las exigencias sociales y educativas contemporáneas.

De esta forma, se persiguen los siguientes objetivos específicos (OE):

**OE1.** Analizar el contexto universitario para identificar el estado actual de las políticas y estructuras inclusivas.

**OE2.** Diseñar un modelo de madurez adaptado a la inclusión universitaria, con indicadores cualitativos y cuantitativos que reflejen niveles progresivos de desarrollo institucional.

**OE3.** Realizar un análisis comparativo entre universidades para validar el modelo y detectar buenas prácticas y áreas de mejora.

**OE4.** Elaborar una hoja de ruta estratégica que identifique áreas prioritarias de mejora, enfatice la sostenibilidad y ayude en el proceso de toma de decisiones.

## RESULTADOS

Se espera que el proyecto genere un impacto directo en la mejora de las estructuras universitarias hacia modelos más inclusivos, sostenibles y participativos, actuando a distintos niveles.

A nivel institucional, contribuirá al fortalecimiento de las capacidades de análisis, planificación y evaluación estratégica mediante el desarrollo de un marco integrado que permita mapear las interrelaciones entre inclusión, sostenibilidad y gobernanza universitaria. Asimismo, se obtendrá un modelo de madurez adaptado y validado, acompañado de indicadores claros para evaluar el progreso institucional y de herramientas prácticas para apoyar la toma de decisiones y el diseño de políticas universitarias.

A nivel académico, el proyecto favorecerá la generación y transferencia de conocimiento a través de publicaciones científicas en acceso abierto, presentaciones en congresos, seminarios y actividades de difusión académica. También se prevé la elaboración de una guía práctica y una hoja de ruta validada para facilitar la implementación de estrategias inclusivas y sostenibles en otras instituciones de educación superior.

A nivel social, se impulsará una cultura universitaria más equitativa y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo espacios abiertos de formación, reflexión y participación. Las acciones divulgativas permitirán acercar los resultados del proyecto a públicos no especializados y fomentar el diálogo social en torno a la inclusión en la educación superior.

Además, el proyecto incorporará principios de ciencia ciudadana mediante la participación activa de estudiantes, personal académico y administrativo en la identificación y rediseño de estructuras inclusivas. Este enfoque colaborativo favorecerá la cocreación de soluciones basadas en experiencias reales, fortaleciendo la transparencia, la responsabilidad social y la transferencia efectiva del conocimiento hacia la sociedad.

## CONCLUSIONES

El proyecto MIPEI plantea una aproximación innovadora para integrar la inclusión dentro de la planificación estratégica universitaria mediante herramientas de evaluación y mejora continua. La propuesta permite superar enfoques aislados, promoviendo una visión transversal de la gobernanza institucional orientada a la sostenibilidad y la equidad.

La creación de un modelo de madurez específico para entornos universitarios facilitará la identificación de fortalezas y debilidades organizativas, aportando criterios objetivos para orientar políticas, recursos y procesos de toma de decisiones. Del mismo modo, la

validación del modelo y el análisis comparativo entre universidades favorecerán el aprendizaje institucional y la transferencia de buenas prácticas, contribuyendo al desarrollo de comunidades académicas más accesibles, colaborativas y comprometidas con los retos sociales actuales.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación que condujo a estos resultados ha recibido financiación del Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València mediante la ayuda Ref. PAID-06-25 “Modelo de madurez institucional para la planificación estratégica en entornos universitarios inclusivos (MIPEI)”.

## REFERENCIAS:

[1]. McNicholl, A., Casey, H., Desmond, D., & Gallagher, P. (2021). The impact of assistive technology use for students with disabilities in higher education: a systematic review. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, 16(2), 130-143.
[2]. Salmi, J., & D’Addio, A. (2021). Policies for achieving inclusion in higher education. Policy Reviews in Higher Education, 5(1), 47-72.
[3]. de la Torre, R., Calleja, G., & Erro-Garcés, A. (2023). Pushing limits in higher education: inclusion services’ perspectives on supporting students with learning disabilities in Spanish universities. Journal of Higher Education Policy and Management, 45(4), 423-441.
[4]. Jin, D., Chai, K. H., & Tan, K. C. (2014). New service development maturity model. Managing Service Quality: An International Journal, 24(1), 86-116.
[5]. Bueno, A., Godinho Filho, M., Cecconello, M., de Santa-Eulália, L. A., Caiado, R. G. G., Ganga, G. M. D., & Carvalho, J. V. (2025). Advancing towards industry 4.0: A maturity model for smart shop floor control. International Journal of Production Economics, 282, 109538.
[6]. Secundo, G., Elena-Perez, S., Martinaitis, Ž., & Leitner, K. H. (2015). An intellectual capital maturity model (ICMM) to improve strategic management in European universities: A dynamic approach. Journal of intellectual capital, 16(2), 419-442.
[7]. Brooks, R., & Rensimer, L. (2023). The European Universities Initiative and European spatial imaginaries. Globalisation, Societies and Education, 23(3), 752–765.

# La mirada como mecanismo de orientación atencional: un análisis mediante eye-tracking

**Mengual-Recuerda, Ana[(1)], Juárez-Varón, David[(2)], Andres, Beatriz[(3)] ), Fota, Andreea[(4)]**

*(1) Grupo de Investigación en Emprendimiento y Sostenibilidad. Universitat Politècnica de València (España), anmenre1@upv.es*
*(2) Grupo de Investigación en Emprendimiento y Sostenibilidad. Universitat Politècnica de València (España), djuarez@upv.es*
*(3) Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de la Producción. Universitat Politècnica de València (España), bandres@cigip.upv.es*
*(4) Departamento de Organización de Empresas. Universitat Politècnica de València (España), anfo1@upv.es*

## RESUMEN

El presente estudio analiza el papel de la mirada como mecanismo de orientación de la atención visual, utilizando la técnica de eye-tracking para identificar patrones de fijación ante distintos estímulos sociales. A partir de un diseño experimental basado en imágenes de personas en diferentes condiciones —mirada directa a cámara, mirada acompañada de señalización y mirada dirigida hacia un punto externo—, se examina cómo varía la distribución atencional en función de la dirección ocular. Los resultados muestran que el rostro, y especialmente los ojos, constituyen el principal foco de atención cuando existe contacto visual directo. Sin embargo, cuando la mirada del individuo se dirige hacia un punto específico, se observa un desplazamiento significativo de la atención hacia esa zona, evidenciando un mecanismo automático de seguimiento de la mirada. Por su parte, los gestos manuales actúan como señales complementarias que modulan la atención de manera secundaria. En conjunto, los hallazgos confirman que la percepción visual está guiada por señales sociales que estructuran la atención de forma no aleatoria, destacando el papel central de la mirada en la interpretación del entorno.

**Palabras clave:** Mirada, atención visual, eye-tracking, percepción, atención conjunta, rostro, dirección de la mirada, heatmap

## INTRODUCCIÓN

La percepción visual constituye un proceso complejo en el que intervienen mecanismos atencionales, cognitivos y sociales que permiten al individuo interpretar de manera eficiente su entorno. Lejos de tratarse de una recepción pasiva de estímulos, la atención visual se organiza en función de la relevancia de la información disponible, priorizando aquellos elementos que resultan significativos desde una perspectiva adaptativa. En este contexto, la mirada humana adquiere un papel central como señal social. Los ojos no solo permiten acceder a información emocional, sino que también actúan como indicadores direccionales que orientan la atención hacia elementos específicos del entorno. Esta capacidad de seguir la mirada de otros individuos responde a un mecanismo evolutivo vinculado a la supervivencia, facilitando la detección de amenazas, oportunidades o focos de interés compartidos. El presente estudio tiene como objetivo analizar cómo la dirección de la mirada influye en la distribución de la atención visual. Para ello, se emplea la técnica de eye-tracking, que permite registrar de manera precisa los patrones de fijación ocular ante diferentes configuraciones visuales, aportando evidencia sobre los procesos que subyacen a la orientación atencional [1]. La

atención a caras, miradas y acciones sociales es clave para la interacción humana y se altera en varias condiciones clínicas. Los trabajos recientes usan sobre todo eye-tracking, realidad virtual y neuroimagen para entender cómo y cuándo los estímulos sociales "ganan" la competencia por la atención. La atención visual a estímulos sociales se guía por señales como la dirección de la mirada y las interacciones entre personas, que tienen prioridad en el sistema visual [2,3]. Este "gaze-cueing" se observa en centenares de estudios y aparece con muchos tipos de tareas y rostros distintos [2]. A un nivel más amplio, la dirección de la mirada es un componente central de la atención compartida: coordinar lo que dos personas miran y lo que saben una de otra [4,5]. Modelos recientes describen un sistema de atención compartida que integra percepción de la mirada, recompensa social, sensación de agencia y procesos mentales de más alto nivel como empatía y teoría de la mente [6]. En suma, la mirada y otros estímulos sociales no solo capturan la atención, sino que organizan la forma en que se construyen y regulan las interacciones sociales.

## OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es determinar, mediante técnicas de neuromarketing, la percepción cognitiva de estudiantes universitarios entre 20 y 30 años, de 3 imágenes de una persona en posturas diferentes (figuras 1, 2 y 3), para identificar la influencia de la postura y de la mirada sobre la atención visual del logotipo. Para hacer esto, se ha utilizado una técnica de neuromarketing que ha permitido analizar la atención de los sujetos al estímulo (seguimiento ocular).

## METODOLOGÍA

### Diseño de la investigación

La investigación se planteó a partir de un diseño experimental cuyo propósito fue analizar cómo diferentes configuraciones de mirada influyen en la distribución de la atención visual. El estudio se centra específicamente en el papel de la dirección ocular como mecanismo de orientación atencional. En el estudio participaron un total de 20 personas (10 de sexo masculino y 10 de sexo femenino). Los participantes realizaron la actividad de forma conjunta en un entorno controlado, lo que permitió exponerlos simultáneamente a los estímulos y recoger sus respuestas de forma homogénea. Para la recogida de datos se empleó la técnica de eye-tracking, que permite registrar los movimientos oculares y las fijaciones visuales de los participantes ante distintos estímulos. A partir de esta información, se generaron mapas de calor (heatmaps), los cuales representan las áreas de mayor concentración de atención.

### Estímulos experimentales

El estímulo que va a emplearse como ejemplo está diseñado para su análisis en el grupo de investigación ©MaCom. La imagen reproducida tiene fines exclusivamente académicos:




**Figura 1**. Imagen persona y logo – postura 01 – mirada al frente. Fuente: elaborado por los autores.




**Figura 2.** Imagen persona y logo – postura 02 – brazo extendido. Fuente: elaborado por los autores.




**Figura 3**. Imagen persona y logo – postura 03 – mirada al lateral. Fuente: elaborado por los autores.

## RESULTADOS

### Mapa de calor (heat map)

A continuación, se muestra la imagen de una persona mirando al frente, para un tiempo de exposición de 10 segundos, con los resultados de visualización acumulados.

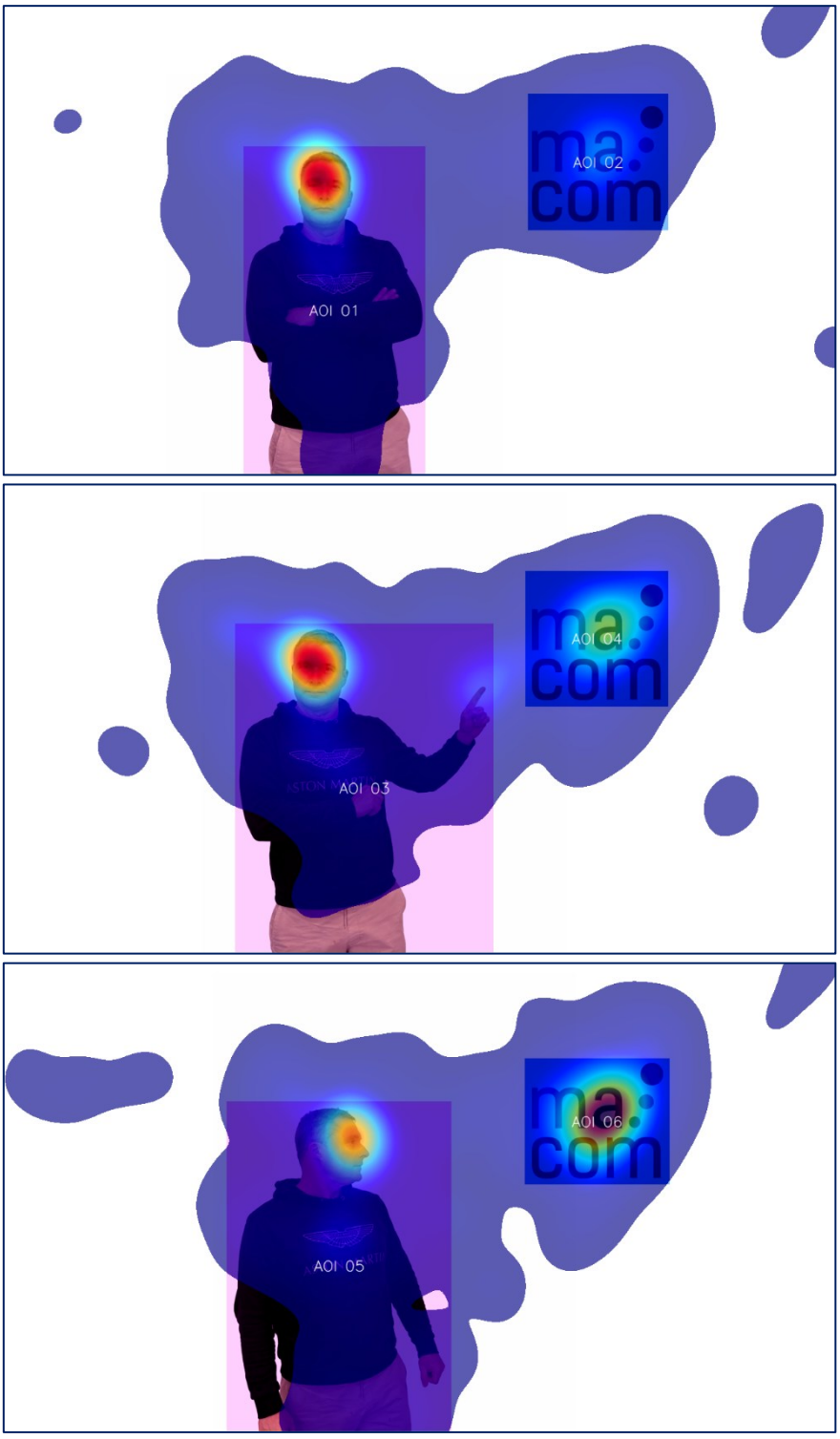



**Figura 4.** AOIs con mapa de calor, para todos los participantes, tiempo de exposición acumulado 10 segundos. Comparativa de las 3 posiciones. Fuente: elaborado por los autores.

Los resultados generados (métricas obtenidas) por el programa de eye tracking para las visualizaciones llevadas a cabo por los participantes, como respuesta a la jerarquía visual, se indican a continuación:

Tiempo exposición: 10 segundos

Total participantes: 20 (10 de sexo masculino y 10 de sexo femenino)

**Tabla 1.** Métricas obtenidas con base a las AOIs para todos los participantes. Fuente: elaborado por los autores.

| AOI Name | Viewers | Total Viewers | TTFF* - Ave Time to 1st View(sec) - 1.0 means not viewed | Dwell Time* Ave Time Viewed (sec) | Dwell Time (%)* Ave Time Viewed (%) | Ave Fixations* | Revisitors* | Average Revisits |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre del AOI | Vista por | Total | TTFF (-1 = no visto) | Tiempo promedio visto | Tiempo promedio visto (%) | Número de fijaciones | Revisitadores | Promedio de revisitas |
| AOI 1 PERSONA MIRANDO AL FRENTE | 20 | 20 | 0.17 | 5.57 | 55.72 | 12.50 | 20 | 3.00 |
| AOI 2 LOGO IMAGEN 1 | 20 | 20 | 2.09 | 2.02 | 20.24 | 5.50 | 15 | 1.87 |
| AOI 3 PERSONA BRAZO EXTENDIDO | 20 | 20 | 0.19 | 4.78 | 47.79 | 11.30 | 20 | 2.95 |
| AOI 4 LOGO IMAGEN 2 | 20 | 20 | 1.89 | 3.13 | 31.34 | 8.05 | 19 | 2.00 |
| AOI 5 PERSONA MIRANDO AL LADO | 20 | 20 | 0.13 | 3.41 | 34.12 | 8.55 | 20 | 2.50 |
| AOI 6 LOGO IMAGEN 3 | 20 | 20 | 1.65 | 4.69 | 46.93 | 8.75 | 18 | 2.28 |

## CONCLUSIONES

Conforme cambia la disposición de la persona, mejora la ratio de personas que vuelven a mirar el logo. Por último, el promedio de revisitas de cada área de interés está encabezado por la persona. Igualmente, conforme cambia la disposición de la persona, mejora la ratio de personas que vuelven a mirar el logo. El presente estudio confirma que la mirada humana constituye un elemento clave en la orientación de la atención visual. A través del análisis mediante eye-tracking, se evidencia que los individuos tienden a fijar su atención prioritariamente en los ojos y a seguir de manera automática la dirección de la mirada de otros. Los resultados muestran que el contacto visual directo maximiza la atención en el rostro, mientras que la dirección de la mirada hacia un punto externo provoca un desplazamiento significativo del foco atencional. Por su parte, los gestos manuales introducen una modulación adicional, aunque menos determinante. Estos hallazgos ponen de manifiesto que la atención visual es un proceso activo y guiado por mecanismos sociales que permiten interpretar el entorno de forma eficiente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Innovación Educativa PIME/25-26/550, «Innovación Educativa en el Acompañamiento de Trabajos Académicos: Entorno Digital Guiado para la autonomía y autorregulación del desarrollo de TFG y TFM» (2025-2026), financiado por la Universitat Politècnica de València (UPV), con el apoyo de la Comisión de Evaluación y Seguimiento de Proyectos de Innovación (CESPIME) y del Instituto de Ciencias de la Educación (ICE).

## REFERENCIAS

[1] Aranda-Martín, B., Ballesteros-Duperón, M., & Lupiáñez, J. (2022). What gaze adds to arrows: Changes in attentional response to gaze versus arrows in childhood and adolescence. British journal of psychology. https://doi.org/10.1111/bjop.12552

[2] McKay, K., Grainger, S., Coundouris, S., Skorich, D., Phillips, L., & Henry, J. (2021). Visual attentional orienting by eye gaze: A meta-analytic review of the gaze-cueing effect. Psychological bulletin, 147 (12), 1269-1289. https://doi.org/10.31234/osf.io/w68qz

[3] Dalmaso, M., Castelli, L., & Galfano, G. (2021). Increased gaze cueing of attention during COVID-19 lockdown. iScience, 24, 103283 - 103283. https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103283

[4] Narganes-Pineda, C., Chica, A. B., Lupiáñez, J., & Marotta, A. (2023). Explicit vs. implicit spatial processing in arrow vs. eye-gaze spatial congruency effects. Psychological Research, 87(1), 242-259

[5] Battaglia, S., Fabius, J., Morávková, K., Fracasso, A., & Borgomaneri, S. (2022). The Neurobiological Correlates of Gaze Perception in Healthy Individuals and Neurologic Patients. Biomedicines, 10. https://doi.org/10.3390/biomedicines10030627

[6] Stephenson, L., Edwards, S., & Bayliss, A. (2021). From Gaze Perception to Social Cognition: The Shared-Attention System. Perspectives on Psychological Science, 16, 553 - 576. https://doi.org/10.1177/1745691620953773

# Síntesis verde de *Carbon Dots* a partir de residuo de café: efecto del ligando en sus propiedades

**Navarro Martínez, Raúl[(1)], Francés Soriano, Laura[(1)], Amat Payá, Ana María[(1)], Arqués Sanz, Antonio[(1)]**

*(1) Universitat Politècnica de València, Departamento de ingeniería textil y papelera, Grupo de procesos de oxidación avanzada, 03801 Alcoy, Alicante, Spain. Email: rnavmar@epsa.upv.es*

## RESUMEN

El presente estudio se centra en la valorización de residuos de café procedentes del sector hostelero mediante la síntesis verde de *Carbon Dots* (CD) y su posterior caracterización. Para ello, se emplearon diferentes ligandos manteniendo el precursor carbonoso, lo que permite evaluar la influencia de los distintos grupos funcionales incorporados en las propiedades finales de los nanomateriales sintetizados.

Los CD obtenidos fueron caracterizados mediante diferentes técnicas morfológicas, químicas y ópticas, permitiendo estudiar su estructura, composición superficial y comportamiento fluorescente. Los resultados obtenidos presentan diferencias en los diferentes campos estudiados, evidenciando la influencia de la funcionalización sobre las características finales del material. Este trabajo demuestra el potencial de los residuos de café como precursor sostenible en la obtención de CD.

**Palabras clave:** nanopartículas, fotoactivas, carbono, carbon dots, síntesis verde.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de demanda global de tecnologías sostenibles ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales y procesos capaces de ofrecer un mayor rendimiento, reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental, social y económico. Esto fomenta el interés por metodologías y materiales más sostenibles o verdes [1]. El uso de biomasa sostenible o residuos biodegradables como precursores ofrece diversas ventajas, entre ellas la simplicidad del proceso de síntesis, amplia disponibilidad de las materias primas y valorización de residuos, en línea con los principios de la química verde [2].

Los *Carbon Dots* (CD) o puntos de carbono son nanopartículas semiconductoras de carbono con tamaños generalmente menores a 10 nm y que presentan propiedades fluorescentes. Estos nanomateriales han despertado gran interés debido a su baja toxicidad, biocompatibilidad y fácil síntesis [3]. Además, presentan una alta estabilidad química y su superficie se puede modificar fácilmente usando distintos ligandos orgánicos. Gracias a estas características, se utilizan en diferentes áreas como la bioimagen, sensores, medicina o dispositivos optoelectrónicos [4]. Actualmente, los CD representan una alternativa prometedora en el campo de la nanotecnología y nanomateriales funcionales avanzados.

Entre los distintos métodos de obtención, destaca la síntesis hidrotermal (HT), debido a su simplicidad y bajo coste. Ésta puede realizarse a partir de materiales orgánicos o biomasa, lo que reduce costes y favorece la sostenibilidad [5]. Por ello, la combinación de síntesis hidrotermal a partir de precursores carbonosos derivados de biomasa o residuos ofrece una vía verde para la producción de CD [6]. En este método, el precursor

carbonoso se disuelve en agua y esta disolución se calienta en un autoclave bajo presión y a temperatura constante que pueden variar entre 120 y 260 ºC [4].

Este tipo de síntesis está influenciado por numerosos parámetros fisicoquímicos, entre los que destacan la temperatura, el tiempo de residencia, la composición del precursor, el pH, la velocidad de calentamiento y el uso de disolventes o agentes pasivantes [7].

## OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es la valorización de residuos de café mediante la síntesis verde de *Carbon Dots* (CD). Para ello, se sintetizarán CD mediante el método hidrotermal a partir de residuos de café como precursor de carbono, incorporando diferentes ligandos orgánicos a la reacción para estudiar su efecto en las propiedades finales del material. Los CD obtenidos serán caracterizados estructuralmente mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y TEM de alta resolución (HRTEM); químicamente mediante espectroscopía de infrarrojo (FTIR), así como sus propiedades ópticas (espectroscopía de absorción y de emisión). Finalmente, se comparará la influencia de los distintos ligandos orgánicos en las propiedades fisicoquímicas y ópticas de los CD sintetizados.

## RESULTADOS

### Síntesis

La síntesis de CD se realizó a partir de residuos de café usado como precursor carbonoso. Previamente al proceso de síntesis, el residuo de café se secó en la estufa con el fin de eliminar la mayor parte de la humedad presente en el precursor. Para evaluar la influencia de la adición de diferentes ligandos en las propiedades fisicoquímicas de los CD finales, se usaron dos ligandos diferentes: L-glutatión y etilendiamina, cuya estructura se muestra en la Figura 1.

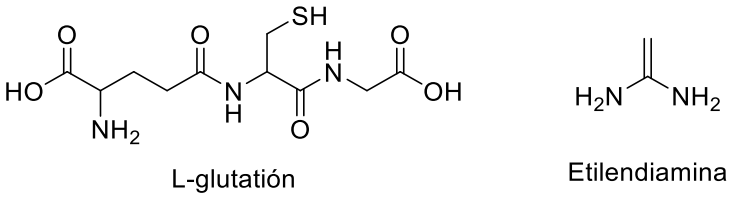



**Figura 1.** Estructura química de los ligandos utilizados en este trabajo: L-glutatión (izquierda) y etilendiamina (derecha).

El procedimiento de síntesis está resumido en la Figura 2. Así, el material seco se introdujo en un vaso de precipitados al que se le añadió agua Milli-Q y una cantidad del ligando correspondiente, agitando vigorosamente hasta conseguir la homogeneización de la mezcla.

Seguidamente, la disolución se transfirió al autoclave para llevar a cabo el tratamiento hidrotermal bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Finalizado el proceso de síntesis, la mezcla de reacción se sometió a centrifugación con el objetivo de separar los sólidos de mayor tamaño de la dispersión de CD, la cual tenía una coloración amarillenta característica.

Después, la dispersión se filtró mediante filtro de jeringa para eliminar los residuos sólidos mayores de 0,22 micras. Por último, las muestras se sometieron a un proceso

de diálisis durante 24 horas con el fin de favorecer la eliminación de impurezas y homogeneizar el tamaño de los CD presentes en la muestra.

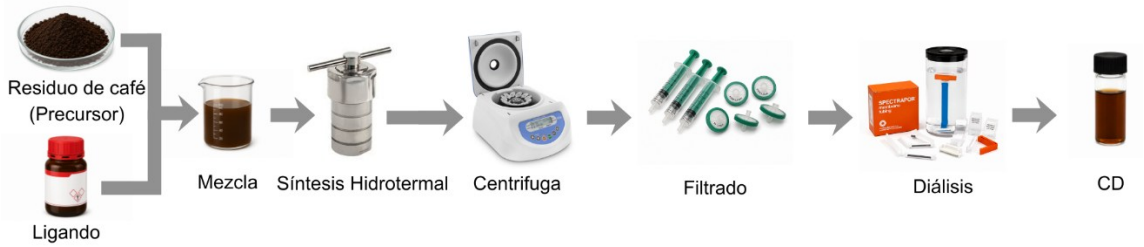



**Figura 2.** Esquema del proceso de síntesis hidrotermal de CD a partir de residuos de café. Imagen apoyada con recursos gráficos generados por Inteligencia Artificial (OpenAI)

Tras el proceso de diálisis, las dispersiones acuosas de CD se liofilizaron. Primero, las muestras se congelaron con el fin de favorecer la posterior eliminación del agua mediante sublimación en condiciones de vacío. Este procedimiento facilitó el almacenamiento de los CD y además evita la fotodegradación y/o aglomeración de los CD.

## Caracterización morfológica

La morfología y tamaño de partícula de los CD se evaluaron mediante TEM y HRTEM, lo que permitió analizar la distribución de tamaños y la posible agregación del material sintetizado.

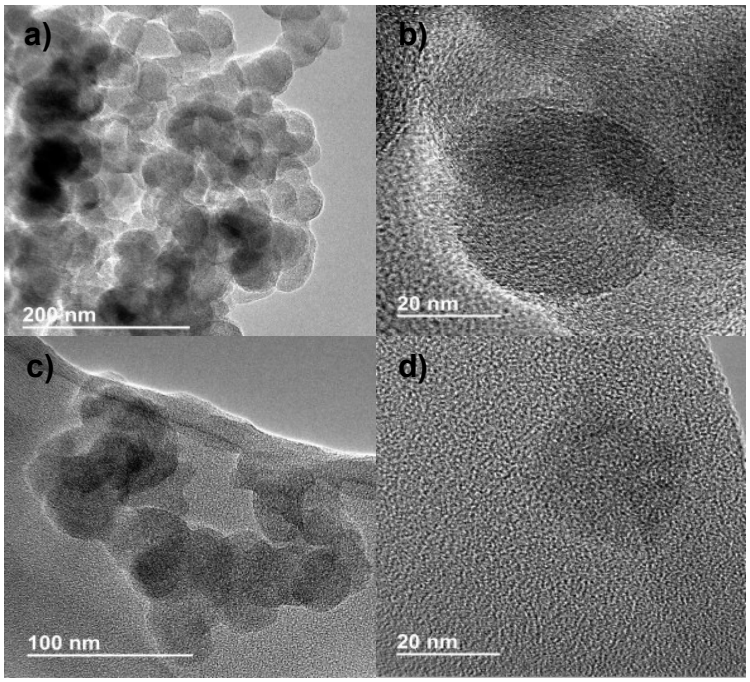



**Figura 3. a)** Imagen de TEM de CD funcionalizados con L-glutatión; **b)** Imagen de HRTEM de CD funcionalizados con L-glutatión; **c)** Imagen de TEM de CD funcionalizados con etilendiamina; **d)** Imagen de HRTEM de CD funcionalizados con etilendiamina.

Las imagenes obtenidas mediante TEM mostradas en la Figura 3 sugieren la aparición de nanopartículas carbonosas con morfología predominantemente cuasi esférica. Se observa que los CDs con L-glutatión tienen un tamaño alrededor de 40 nm, mientras que los CD con etilendiamina tienen un tamaño de aproximado de 30 nm. No obstante,

se identifican regiones con nanopartículas de menor tamaño, con dimensiones cercanas a los 20 nm.

Sin embargo, se observó cierta tendencia a la agregación, debido probablemente a las interacciones superficiales entre partículas en el proceso de secado y deposición de la muestra en la rejilla para el TEM.

**Caracterización química**

Se realizaron los espectros FTIR (Figura 4) de los diferentes CD para determinar su composición química. Cabe destacar que en todos los casos se observan señales correspondientes al metanol residual, utilizado durante la preparación de las muestras para su dispersión, con bandas características en la región ~3300 $cm^{-1}$ (estiramiento O-H) y ~2900 $cm^{-1}$ (flexión C-H).

No obstante, se observan claras diferencias entre ambas muestras, las cuales pueden atribuirse a la incorporación de los distintos ligandos en la estructura superficial de los CD. En el caso de los CD con L-glutatión, se observa una banda ancha en la región 2900-3400 $cm^{-1}$, correspondiente a los estiramientos O-H de grupos carboxílicos y N-H de amidas y aminas presentes en el ligando. Además, se distinguen las bandas del estiremiento C=O del carboxílico libre a ~1720 $cm^{-1}$ o el del enlace peptídico a ~1540 $cm^{-1}$.

En el caso de los CD con etilendiamina, se identifica una banda en torno a 1590 $cm^{-1}$ asociada a la flexión N-H, así como una señal a 1300 $cm^{-1}$ atribuida al estiramiento C-N, consistente con la presencia de grupos amina en la superficia de los CD.

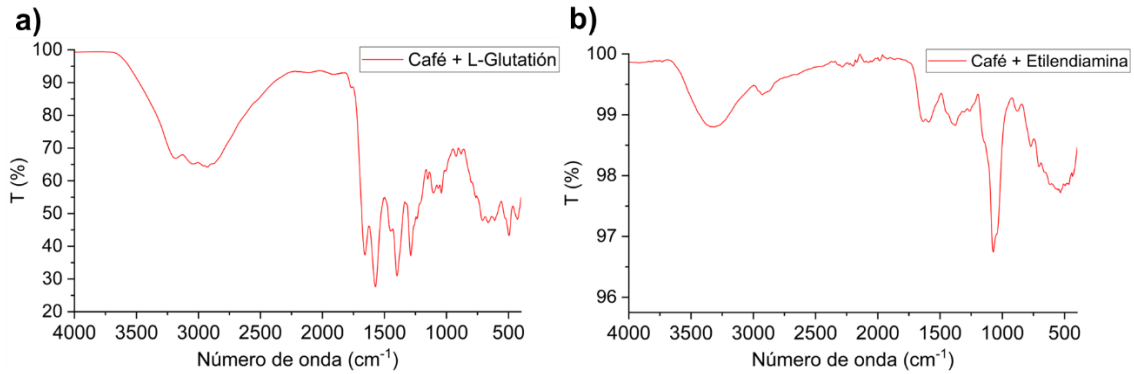



**Figura 4. a)** Espectro FTIR de la muestra de CD sintetizada a partir de café y L-glutatión; **b)** Espectro FTIR de la muestra de CD sintetizada a partir de café y etilendiamina.

**Caracterización óptica**

La caracterización óptica de los CD se realizó mediante espectroscopía de absorción y emisión. La Figura 5 muestra los espectros de absorción para las dos muestras de CD en dispersión acuosa. En ambos casos se observan dos contribuciones principales de absroción. La primera corresponde a una banda intensa en el UV, entre 250-290 nm, asociada a transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ del dominio $sp^2$ carbonoso. La segunda, entre 300 y 400 nm, que se atribuye a transiciones $n \rightarrow \pi^*$ de los grupos funcionales introducidos por los ligandos, correspondientes a los estados superficiales funcionalizados.

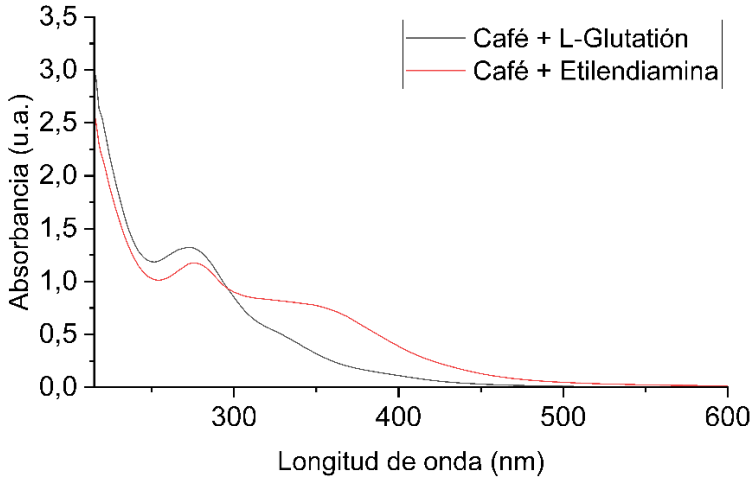



**Figura 5.** Espectro de absorbancia de los CD sintetizados en presencia de L-glutatión (línea negra) y etilendiamina (línea roja).

La mayor absorción en el ultravioleta de los CD con L-glutatión se debe a una superficie más rica en grupos oxigenados y nitrogenados, con estados superficiales más localizados. Mientras que los CD con etilendiamina muestran una absorción más extendida hacia la región visible, indicando una mayor deslocalización electrónica, debida posiblemente a la contribución del dopaje del núcleo con el nitrógeno (N-doping).

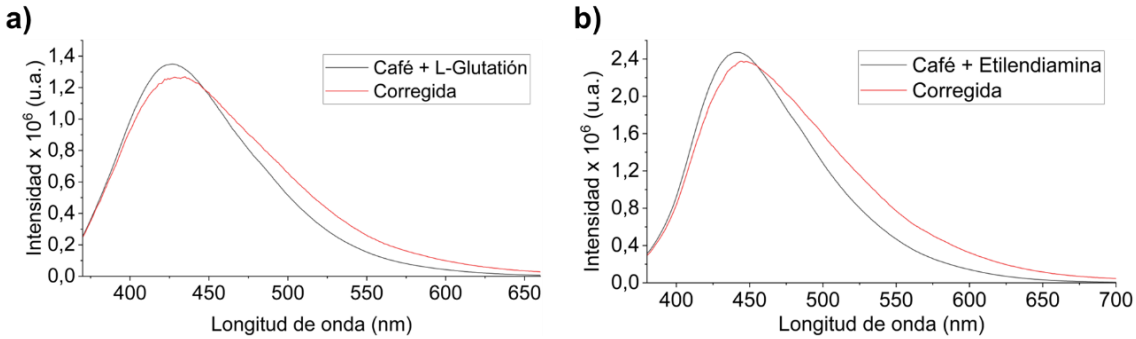



**Figura 6. a)** Espectro de emisión de CD sintetizados a partir de café y L-Glutatión, $\lambda_{EXC}$: 350 nm; **b)** Espectro de emisión de CD sintetizados a partir de café y Etilendiamina, $\lambda_{EXC}$: 360 nm.

En la Figura 6 se puede ver que los espectros de emisión de ambas muestras presentan una banda ancha en la región azul. La muestra sintetizada en presencia de etilendiamina tiene una mayor intensidad de emisión y un desplazamiento del máximo de emisión de aproximadamente 25 nm hacia mayores longitudes de onda, en comparación con los CD con L-glutatión.

## CONCLUSIONES

En el presente estudio se han sintetizado y caracterizado Carbon Dots (CD) a partir de residuo de café usado via la síntesis hidrotermal. Se ha evaluado la influencia de la adición de diferentes ligandos a la mezcla de reacción, concretamente L-glutatión y etilendiamina, en las propiedades físicas, químicas y ópticas de los CD sintetizados. Este procedimiento constituye una nueva ruta sintética verde, que contribuye a la revalorización de residuos alimentarios mediante la obtención de materiales funcionales de alto valor añadido. Las diferencias en tamaño observadas mediante TEM en los diferentes CD sugieren que la naturaleza y tamaño del ligando desempeña un papel

determinante en los procesos de nucleación, crecimiento y pasivación superficial durante la síntesis. Desde el punto de vista químico, los análisis FTIR evidencian la incorporación de los ligandos en la superficie de los CD. En cuanto a las propiedades ópticas, los espectros de absorción confirman la coexistencia de transiciones π–π* del núcleo $sp^2$ y transiciones n–π* asociadas a estados superficiales. Las diferencias observadas entre ambos sistemas indican que la naturaleza del ligando modula significativamente la estructura electrónica de los CD, afectando la densidad de estados superficiales y la extensión de la absorción hacia el visible. Estos resultados ponen de manifiesto el papel clave del ligando en las propiedades finales de los CD, así como el potencial de esta nueva ruta sostenible para la valorización de residuos.

## REFERENCIAS


[1] Julien, Patrick A.; Mottillo, Cristina; Friščić, Tomislav (2017). "Metal–organic frameworks meet scalable and sustainable synthesis".*Green Chemistry*, v. 19, n. 12, p.p. 2729–2747. https://doi.org/10.1039/C7GC01078H

[2] Soni, Himanshi; Bhattu, Monika; Kaur, Manvinder; Verma, Meenakshi; Singh, Jagpreet (2024). "Recent advances in waste-derived carbon dots and their nanocomposites for environmental remediation and biological applications". *Environmental Research*, v. 251, p. 118560. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118560

[3] Huaxin, Liu et al. (2024). "A review of carbon dots in synthesis strategy". *Coordination Chemistry Reviews*, v. 498, p. 215468 https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215468

[4] Shawninder, Chahal; Macairan, Jun-Ray; Yousefi, Nariman; Tufenkji, Nathalie; Naccache, Rafik (2021). "Green synthesis of carbon dots and their applications". *RSC Advances*, v. 11, n. 41, p.p. 25354–25363 https://doi.org/10.1039/D1RA04718C

[5] Sethulekshmi, A.S. *et al.* (2025). "Advances in doped carbon quantum dots: synthesis, mechanisms, and applications in sensing technologies". *Chemical Engineering Journal*. v. 514, p. 163262. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163262

[6] Zijing, Wang; Changotra, Rahil; Dasog, Mita; Selopal, Gurpreet Singh; Yang, Jie; He, Quan Sophia (2025). "Carbon quantum dots: Synthesis via hydrothermal processing, doping strategies, integration with photocatalysts, and their application in photocatalytic hydrogen production". *Sustainable Materials and Technologies*, v. 44, p. e01386. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01386

[7] Ben Khamsa, Eya et al. (2026). "Carbon quantum dots from waste and biomass for water treatment: A review on nanomaterials AI-enhanced synthesis and characterization". *Journal of Environmental Chemical Engineering*. v. 14, n. 3, p. 122899 https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.122899

# Protocolo metodológico para la selección de variables e indicadores compuestos en el estudio de la cocreación y ecoinnovación empresarial basado en PITEC 2016

**Gómez Palacios, César [(1)], Peiró-Signes, Ángel [(2)], Trull Domínguez, Óscar [(3)]**

*(1) Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de Valéncia, cegopa@eio.upv.es*
*(2) Departamento de Organización de Empresas, Universitat Politècnica de Valéncia, anpeisg@omp.upv.es*
*(3) Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de Valéncia, otrull@eio.upv.es*

## RESUMEN

La eco innovación está cada vez más reconocida como vía crítica hacia la sostenibilidad ambiental. Si bien la cocreación se reconoce como motor de la innovación [1,2,3], su relación con la eco innovación requiere mayor estudio.

El Panel de Innovación Tecnológica (PITEC 2016) constituye la implementación española de la *Community Innovation Survey* (CIS) y representa una fuente microeconómica de referencia para análisis empíricos de innovación empresarial [4]. Sin embargo, carece de indicadores compuestos de cocreación con el cliente y eco innovación en su diseño de registro. Este trabajo documenta el protocolo de selección y construcción de las variables agregadas a emplear en el estudio de dicha relación, sobre una muestra de 3.000 empresas innovadoras españolas extraídas de PITEC 2016.

Se describen los criterios de selección de variables originales, los procedimientos de agregación en índices compuestos IDX_ECOINNOVACION, IDX_CC, IDX_BARRIER_FIN e IDX_BARRIER_KNOW. Se justifica la operacionalización de la eco innovación a partir de los objetivos medioambientales declarados (OBJET10, OBJET11, OBJET13), la co creación mediante la importancia de los clientes como fuente de información (FUENTENEW3, FUENTENEW4), y las barreras financieras y de conocimiento mediante sus respectivos ítems FACE y FACI.

**Palabras clave:** PITEC 2016; variables agregadas; eco innovación; cocreación; protocolo metodológico; índices compuestos.

## INTRODUCCIÓN

Las encuestas de innovación armonizadas, como PITEC 2016, constituyen una fuente importante de microdatos empresariales para el análisis empírico de la innovación [5,9]. PITEC recoge, con periodicidad anual y alcance censal para empresas de más de 200 trabajadores, información sobre objetivos, actividades, cooperación, fuentes de información y barreras a la innovación, lo que lo convierte en un instrumento de referencia para investigadores en organización de empresas y economía de la innovación.

Sin embargo, los constructos teóricos habitualmente empleados en la literatura de co creación con el cliente, eco innovación, innovación abierta y barreras a la innovación,

no disponen a menudo de variables únicas y directamente equivalentes en las bases de datos empresariales. El estudio de relaciones entre estos constructos requiere la selección de variables simples y construcción de índices compuestos que agreguen información de forma lógica. Los índices construidos a menudo incorporan variables de distinto tipo (como escalas de respuesta Likert, variables binarias, variables continuas cuantitativas), lo que exige su tratamiento previo específico. Estas elecciones (qué ítems incluir, cómo transformar la escala o qué método de agregación emplear) rara vez se explicitan con suficiente detalle en los trabajos empíricos que las adoptan [6,7], lo que dificulta la replicación y la comparación entre estudios.

La escala, distribución y codificación de las variables de entrada hace que esta etapa inicial de construcción del conjunto de variables sea determinante para su uso válido en estudios analíticos posteriores a realizar por los autores, aplicando técnicas estadísticas de diferente naturaleza: desde el análisis descriptivo, ANOVA o regresión logística hasta métodos de machine learning supervisado y no supervisado.

## OBJETIVOS

El objetivo general del presente protocolo es documentar, de forma sistemática y reproducible, el proceso de selección, construcción y validación del conjunto de variables agregadas empleado en el análisis de la cocreación empresa-cliente y su relación con la ecoinnovación a partir de los microdatos del Panel de Innovación Tecnológica (PITEC) edición 2016.

**Tabla 1.** Categoría, justificación y etiquetas de las variables seleccionadas.

| Resultado (output) | Co creación (input principal) | Barreras a la innovación | Apertura e innovación abierta | Control y caracterización empresarial |
|---|---|---|---|---|
| Indicadores de eco-innovación de PITEC 2016, incluyendo una variable binaria y un índice compuesto. Constituyen la variable dependiente del estudio. | Medición de la co creación empresa-cliente mediante la relevancia de los clientes como fuente de innovación y cooperación en I+D. Constituye el input principal del modelo. | Indicadores de barreras financieras y de conocimiento. Se consideran posibles variables mediadoras o moderadoras entre co creación y eco-innovación. | Métricas de amplitud y profundidad del conocimiento externo utilizado, representando la orientación hacia innovación abierta. | Variables estructurales para segmentar y contextualizar resultados según tamaño, sector, estructura empresarial e intensidad innovadora. |
| BIN_ECOINNOVACION, IDX_ECOINNOVACION, OBJET10, OBJET11, OBJET13 | FUENTENEW3, FUENTENEW4, IDX_CC, COOPERA | FACE1, FACE2, FACE3, IDX_BARRIER_FIN, FACI1, FACI2, FACI3, FACI4, IDX_BARRIER_KNOW | OPEN_BREADTH, OPEN_DEPTH | TAMANO, LOG_TAMANO, SECTOR_2D, GRUPO, IDIN, IDEX |

Para ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. **Identificar y justificar el set de variables:** variables de resultado (output), de co creación (input principal), de barreras a la innovación, de apertura e innovación abierta y de Control y caracterización empresarial (ver tabla 1).

2. **Describir la muestra analítica.** Caracterizar el subconjunto de empresas innovadoras de PITEC 2016 extraído tras la aplicación de los criterios de filtrado (n = 3.000), describiendo su distribución por sector, tamaño y actividad de co creación, como punto de partida para los análisis estadísticos y de aprendizaje automático desarrollados en los artículos empíricos de la tesis**.**

## RESULTADOS O METODOLOGÍA

### Variables seleccionadas y construcción de índices compuestos

Tras la aplicación del protocolo de selección descrito en la sección anterior, el conjunto analítico definitivo comprende 14 variables distribuidas en cinco bloques temáticos (Tabla 2). Todas las variables proceden directamente de PITEC 2016 (INE/FECYT) [4]. En ningún caso se ha recurrido a imputación: los valores ausentes en ítems de barreras o fuentes de información se han mantenido como tal, dado que su ausencia es en sí misma informativa del perfil innovador de la empresa.

**Tabla 2.** Variables seleccionadas: origen, escala e indicador derivado.

| Variable/Índice | Ítems PITEC origen | Escala | N válido | Bloque T. |
|---|---|---|---|---|
| BIN_ECOINNOVACION | OBJET10, OBJET11, OBJET13 | 0/1 | 3.000 | Output |
| IDX_ECOINNOVACION | OBJET10, OBJET11, OBJET13 | 10–40 | 1.030 | Output |
| IDX_CC | FUENTENEW3, FUENTENEW4 | 10–40 | 3.000 | Co creación |
| COOPERA | COOPERA | 0/1 | 3.000 | Co creación |
| IDX_BARRIER_FIN | FACE1, FACE2, FACE3 | 10–40 | 3.000 | Barreras |
| IDX_BARRIER_KNOW | FACI1, FACI2, FACI3, FACI4 | 10–40 | 3.000 | Barreras |
| OPEN_BREADTH | FUENTENEW1–12 (conteo) | 3–12 | 3.000 | Apertura |
| OPEN_DEPTH | FUENTENEW1–12 (sum. pond.) | 17–44 | 3.000 | Apertura |
| TAMANO | TAMANO | Continua | 3.000 | Control |
| SECTOR_2D | ACTIN (recodif.) | 0/1/2 | 3.000 | Control |
| GRUPO | GRUPO | 0/1 | 3.000 | Control |
| IDIN | IDIN | 0/1 | 3.000 | Control |
| IDEX | IDEX | 0/1 | 3.000 | Control |

*Nota: Los índices compuestos se calculan como media aritmética de los ítems × 10, homogeneizando la escala de respuesta (1–4) al rango 10–40.*

### Justificación de la operacionalización por constructo

La selección de ítems para cada índice responde a criterios teóricos y de disponibilidad en PITEC 2016. Para la eco innovación, se emplean los objetivos medioambientales OBJET10 (reducción del consumo de energía o materiales), OBJET11 (reducción de las emisiones o residuos) y OBJET13 (cumplimiento de requisitos medioambientales). Estos tres ítems recogen las dimensiones de proceso, output y normativa que la literatura identifica como núcleo de la eco innovación empresarial [ver estudio René Kemp & Pearson, 2007]. Se excluyen deliberadamente otros objetivos de la misma

batería (como mejora de la calidad o reducción de costes) por no tener carácter ambiental explícito. El indicador binario BIN_ECOINNOVACION complementa al índice continuo: permite incluir en el análisis a todas las empresas de la muestra, incluidas las que no responden a los ítems OBJET por no haber declarado objetivos medioambientales.

Para la co creación, las variables FUENTENEW3 (clientes del sector privado) y FUENTENEW4 (clientes del sector público) operacionalizan el grado en que la empresa incorpora al cliente como fuente activa de información para la innovación, lo que recoge la dimensión de cogeneración de conocimiento que distingue la co creación de la mera orientación al mercado [1,2,3]. De las doce fuentes de información disponibles en PITEC, estas son las dos que identifican específicamente al cliente (privado o público) frente a proveedores, competidores o universidades.

Las barreras se desglosan en financieras (FACE1: coste demasiado elevado; FACE2: falta de fondos propios; FACE3: falta de financiación externa) y de conocimiento (FACI1: falta de personal cualificado; FACI2: falta de información sobre tecnología; FACI3: falta de información sobre mercados; FACI4: dificultad para encontrar socios de cooperación). Esta distinción, consolidada en la literatura de economía de la innovación [9], permite contrastar qué tipo de restricción es más relevante para la relación co creación eco innovación en distintos perfiles empresariales.

Finalmente, la homogeneización de escala al rango 10–40 se obtiene multiplicando la media aritmética de los ítems (escala original 1–4) por 10. Esta transformación lineal no altera las propiedades ordinales de las variables, pero facilita la legibilidad de los coeficientes en los modelos de regresión y elimina la ambigüedad que surgiría al comparar índices de distinto número de ítems.

Los cuatro índices compuestos se han construido como indicadores formativos, siguiendo a Diamantopoulos y Winklhofer [8]: cada ítem captura una dimensión distinta del constructo y no se espera que covaríen entre sí. Esto implica que el Alpha de Cronbach no es el estadístico adecuado para evaluar su coherencia; de hecho, las correlaciones inter-ítem observadas, próximas a cero, responden precisamente a la heterogeneidad de las barreras y fuentes de información que las encuestas CIS buscan medir [9].

### Estadísticos descriptivos de la muestra analítica

La muestra final comprende n = 3.000 empresas innovadoras de PITEC 2016. Las Tablas 3 y 4 recogen los estadísticos descriptivos de las principales variables cuantitativas y la distribución de las dicotómicas.

**Tabla 3.** Estadísticos descriptivos (n = 3.000).

| Variable | N | Media | DT | Mín. | Mediana | Máx. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| IDX_ECOINNOVACION | 1.030 | 25,42 | 7,19 | 10,0 | 26,67 | 40,0 |
| IDX_CC | 3.000 | 25,00 | 8,39 | 10,0 | 25,00 | 40,0 |
| IDX_BARRIER_FIN | 3.000 | 25,04 | 6,89 | 10,0 | 23,33 | 40,0 |
| IDX_BARRIER_KNOW | 3.000 | 25,09 | 5,92 | 10,0 | 25,00 | 40,0 |
| OPEN_BREADTH | 3.000 | 8,41 | 1,54 | 3,0 | 8,00 | 12,0 |
| OPEN_DEPTH | 3.000 | 29,98 | 4,10 | 17,0 | 30,00 | 44,0 |
| TAMANO (empleados) | 3.000 | 159,9 | 378,1 | 1 | 54 | 6.427 |

**Tabla 4.** Variables dicotómicas.

| Variable binaria | n=1 | % |
|---|---|---|
| BIN_ECOINNOVACION | 999 | 33,3% |
| COOPERA | 1.032 | 34,4% |
| IDIN (I+D interna) | 1.536 | 51,2% |
| IDEX (I+D externa) | 909 | 30,3% |

En cuanto a la composición sectorial, el 67,7% de la muestra pertenece al sector de servicios u otros (SECTOR_2D=0), el 21,2% a manufactura de media-alta tecnología (SECTOR_2D=2) y el 11,1% a industrias de alta tecnología (SECTOR_2D=1), distribución coherente con el perfil del tejido empresarial innovador español documentado por la OCDE [4,10]. La variable TAMANO muestra la fuerte asimetría positiva característica de las muestras empresariales (mediana=54 empleados frente a media=160), lo que justifica el uso de su transformación logarítmica (LOG_TAMANO) en los análisis de regresión y aprendizaje automático de futuros artículos empíricos.

## CONCLUSIONES

En primer lugar, PITEC 2016 proporciona una cobertura suficiente para operacionalizar los constructos centrales de la investigación. Los indicadores de eco-innovación (BIN_ECOINNOVACION, IDX_ECOINNOVACION), cocreación (IDX_CC, COOPERA), barreras a la innovación (IDX_BARRIER_FIN, IDX_BARRIER_KNOW) e innovación abierta (OPEN_BREADTH, OPEN_DEPTH) pueden construirse directamente a partir de los ítems del cuestionario, sin recurrir a fuentes externas ni a procedimientos de imputación complejos, lo que garantiza la trazabilidad y reproducibilidad del análisis.

En segundo lugar, la muestra final depurada para análisis de n = 3.000 empresas innovadoras presentan una distribución sectorial y de tamaño representativa del tejido empresarial innovador español, con predominio de empresas de servicios (67,7%), una proporción significativa de empresas manufactureras de media-alta tecnología (21,2%) y un perfil mayoritariamente pyme (mediana de 54 empleados). Esta heterogeneidad estructural constituye un activo para el análisis, ya que permite explorar efectos de moderación por sector y tamaño en los estudios empíricos subsiguientes.

La naturaleza formativa de los índices (coherente con el diseño de las CIS) no es un defecto de medida sino una característica propia de los constructos de barreras e información. Esto tiene consecuencias directas para el análisis pues aconseja la interpretación por ítems individuales cuando los modelos lo permitan (y hace el Alpha de Cronbach inapropiado). La homogeneización de escala al rango 10-40 facilita la comparabilidad entre índices y su incorporación directa en modelos de regresión y algoritmos de aprendizaje automático.

Finalmente, el conjunto de variables documentado en este protocolo constituye la base de datos de entrada para los artículos empíricos de la tesis doctoral Estudio de las barreras y facilitadores de cocreación de las empresas con los clientes y su relación con la eco innovación, que abordarán sucesivamente el análisis estadístico no paramétrico de las relaciones entre cocreación y eco innovación, y la construcción de modelos predictivos y tipologías empresariales mediante técnicas de aprendizaje automático

supervisado y no supervisado. La existencia de este registro explícito de protocolo no constituye un trámite formal: se realiza para intentar comparar resultados entre sectores y tamaños de empresa, sin ambigüedad sobre qué se mide en cada caso.

## REFERENCIAS


[1] C.K. Prahalad; Venkat Ramaswamy (2000). "Co-opting Customer Competence" *Harvard business review*, v. 78, n. 1, p.p. 79-90.

[2] C.K. Prahalad; Venkat Ramaswamy (2004). "Co-creation experiences: The next practice in value creation". *Journal of Interactive Marketing*, v. 18, n. 3 (Issue), p.p. 5-13. https://doi.org/10.1002/dir.20015

[3] C.K. Prahalad; Venkat Ramaswamy (2004). " Co-creating unique value with customers". *Strategy & Leadership* (2004), v. 32, n. 3, p.p. 4-9. https://doi.org/10.1108/10878570410699249

[4] INE; FECYT (2018). Panel de Innovación Tecnológica (PITEC). Metodología y descripción de la encuesta, edición 2016. Instituto Nacional de Estadística / Fundacion Española para la Ciencia y la Tecnología, Madrid.

https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadística_C&cid=1254736176755

[5] Mairesse, Jacques; Mohnen, Pierre (2010). "Using Innovations Surveys for Econometric Analysis". *Handbook of the Economics of Innovation*, v. 2, pp. 1129-1155. https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)02010-7

[6] OECD; European Commission (2008). “Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide”. *OECD Publishing*. ISBN 978-92-64-04345-9. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en

[7] Hagedoorn, John; Cloodt, Myriam (2003). "Measuring innovative performance: is there an advantage in using multiple indicators?". *Research Policy*, v. 32, n. 8, pp. 1365-1379. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00137-3

[8] Diamantopoulos, Adamantios; Winklhofer, Heidi M. (2001). "Index construction with formative indicators: an alternative to scale development". *Journal of Marketing Research*, v. 38, n. 2, p.p. 269-277. https://doi.org/10.1509/jmkr.38.2.269.18845

[9] D'Este, Pablo; Iammarino, Simona; Savona, Maria; von Tunzelmann, Nick (2012). "What hampers innovation? Revealed barriers versus deterring barriers". *Research Policy*, v. 41, n. 2, p.p. 482-488. https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.09.008

[10] OCDE; Eurostat (2018). Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation. 4.ª ed. *OECD Publishing, París*. https://doi.org/10.1787/9789264304604-en

# Evaluación heurística de un entorno virtual de aprendizaje: estudio de caso en PoliformaT

**Blanes, Hugo [(1)], Sempere, Silvia [(2)], Virgili, Jordi [(3)]**

*(1) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universidad Politécnica de Valencia, 03801 Alcoy, España. hublagi@degi.upv.es*

*(2) Departamento de Dibujo, Universidad Politécnica de Valencia, 03801 Alcoy, España. ssempere@dib.upv.es*

*(3) Department of Computer Science and Industrial Engineering, Universitat de Lleida, 25001 Lleida, Spain jordi.virgili@udl.cat*

## RESUMEN

Las plataformas LMS constituyen infraestructuras centrales en la educación superior, pero su valor depende de que sus funcionalidades sean comprensibles, eficientes y coherentes para alumnado y profesorado. Este trabajo presenta una evaluación heurística de PoliformaT, entorno virtual de aprendizaje de la Universitat Politècnica de València (UPV), con el objetivo de identificar problemas de usabilidad vinculados a la navegación, la organización de la información y la interacción general. La evaluación se realizó mediante una inspección experta individual basada en las diez heurísticas de Nielsen y una escala de severidad de 0 a 4. Los resultados muestran incidencias críticas en la correspondencia entre el sistema y el mundo real y en el diseño estético y minimalista, así como problemas graves en prevención de errores y flexibilidad de uso. El estudio confirma la utilidad del análisis heurístico como diagnóstico inicial y plantea futuras pruebas con usuarios.

**Palabras clave:** usabilidad; experiencia de usuario; evaluación heurística; LMS; PoliformaT; UX.

## INTRODUCCIÓN

La consolidación de los entornos virtuales de aprendizaje ha transformado la experiencia universitaria al integrar contenidos, comunicación, evaluación y gestión académica. En este contexto, la calidad de un LMS no depende solo de sus funcionalidades, sino de la capacidad del sistema para facilitar interacciones comprensibles, eficientes y coherentes [1].

Las plataformas educativas suelen acumular herramientas, módulos y rutas de acceso que pueden generar sobrecarga cognitiva, inconsistencias visuales y estructuras de navegación complejas. Desde la perspectiva de la experiencia de usuario, estos problemas afectan a la construcción de modelos mentales estables y a la realización eficiente de tareas académicas recurrentes [2].

Para identificar este tipo de incidencias, la evaluación heurística constituye un método consolidado de inspección de usabilidad. Nielsen y Molich la formularon como un procedimiento en el que varios evaluadores analizan una interfaz a partir de principios previamente definidos [3], posteriormente ampliados por Nielsen como marco explicativo para interpretar problemas de interacción [4]. En este marco, el presente trabajo evalúa PoliformaT con el objetivo de detectar problemas de usabilidad vinculados a la navegación, la organización de la información y la interacción general del sistema.

## MARCO TEÓRICO

Las plataformas LMS constituyen una infraestructura central en la educación superior, al integrar herramientas para la distribución de contenidos, la comunicación académica, la gestión de actividades y la evaluación del aprendizaje [1]. Su usabilidad puede entenderse como el grado en que un sistema permite a usuarios específicos alcanzar objetivos concretos con efectividad, eficiencia y satisfacción en un contexto de uso determinado [5]. En este tipo de entornos, esta dimensión resulta especialmente relevante porque las tareas son recurrentes, heterogéneas y vinculadas a procesos académicos de alto valor para alumnado y profesorado.

La evaluación heurística es un método de inspección orientado a identificar problemas de interacción en una interfaz a partir de principios previamente definidos. Nielsen y Molich la plantearon como un procedimiento en el que varios evaluadores inspeccionan una interfaz para detectar problemas de usabilidad [3]. Posteriormente, Nielsen consolidó las diez heurísticas como principios amplios para interpretar dificultades de interacción, entre ellas la visibilidad del estado del sistema, la correspondencia con el mundo real, la prevención de errores, el reconocimiento antes que el recuerdo o el diseño estético y minimalista [4]. Estas heurísticas resultan adecuadas para analizar plataformas LMS, ya que permiten observar problemas de navegación, lenguaje, carga informativa, prevención de errores y claridad de los flujos de trabajo académico.

La interacción con sistemas digitales complejos depende también de la capacidad del usuario para construir modelos mentales coherentes. Cuando una interfaz presenta denominaciones ambiguas, estructuras inconsistentes o rutas poco previsibles, el usuario debe reinterpretar continuamente el funcionamiento del sistema [2]. Asimismo, principios como la Ley de Hick y la Ley de Fitts ayudan a explicar cómo el exceso de alternativas, la falta de jerarquía visual o la disposición de los elementos interactivos pueden incrementar el esfuerzo cognitivo y dificultar la ejecución eficiente de tareas [8]. Desde este enfoque, la usabilidad de PoliformaT no se interpreta como una suma de incidencias aisladas, sino como un sistema de interacción que puede facilitar o dificultar la comprensión, la orientación y la acción dentro del entorno virtual.

## METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló mediante una evaluación heurística experta individual de PoliformaT, entorno virtual de aprendizaje utilizado en la Universitat Politècnica de València. La elección de este método responde a su utilidad como técnica diagnóstica para identificar problemas de interacción en sistemas existentes a partir de principios de usabilidad previamente definidos [3], [7], [9].

La evaluación se articuló a partir de las diez heurísticas de Nielsen, adaptadas al contexto de una plataforma LMS. Para cada heurística se consideraron checkpoints vinculados a tareas habituales del entorno académico: navegación por asignaturas, localización de herramientas, entrega de tareas, gestión de recursos, configuración de notificaciones, comunicación interna y acceso a documentación de ayuda.

El procedimiento se organizó en cuatro fases. En primer lugar, se realizó una exploración general de la plataforma para familiarizarse con su estructura y funcionalidades principales. En segundo lugar, se inspeccionaron las áreas seleccionadas a partir de las heurísticas definidas. En tercer lugar, se registraron las incidencias detectadas en una matriz de evaluación, incluyendo heurística afectada, descripción del problema, evidencias observadas y recomendaciones de mejora.

Finalmente, se asignó a cada incidencia un valor de severidad entre 0 y 4: 0 = ausencia de problema, 1 = problema cosmético o leve, 2 = problema menor, 3 = problema grave y 4 = problema crítico [4].

El análisis combinó una dimensión cuantitativa, basada en la severidad asignada a cada heurística, y una dimensión cualitativa, centrada en la interpretación de los problemas y en la formulación de recomendaciones. Dado que la evaluación fue realizada por un único evaluador, los resultados deben entenderse como una fase diagnóstica inicial. Esta limitación no invalida el estudio, pero sí aconseja complementar los hallazgos con futuras pruebas con usuarios y otros métodos de evaluación empírica [9], [10].

## RESULTADOS

La evaluación heurística permitió identificar incidencias distribuidas en las diez heurísticas de Nielsen. Los problemas más relevantes se concentraron en la correspondencia entre el sistema y el mundo real y en el diseño estético y minimalista, ambas con una severidad crítica. También se observaron incidencias graves en prevención de errores y flexibilidad y eficiencia de uso. El resto de las heurísticas presentó problemas moderados o leves, principalmente vinculados a la visibilidad del estado del sistema, el control del usuario, la ayuda y la consistencia visual.

**Tabla 1.** Principales incidencias detectadas según heurística y severidad

| Heurística | Incidencias principales | Severidad |
|---|---|---|
| Correspondencia entre el sistema y el mundo real | Iconos poco representativos; menú lateral con lógica poco clara; uso de términos como “sitio” frente a “asignatura”. | 4 |
| Diseño estético y minimalista | Sobrecarga visual; exceso de opciones simultáneas; escasa jerarquía visual; acciones secundarias demasiado expuestas. | 4 |
| Prevención de errores | Falta de avisos ante posible pérdida de datos; fechas inválidas seleccionables; ausencia de confirmación en acciones críticas. | 3 |
| Flexibilidad y eficiencia de uso | Personalización limitada; configuración compleja de notificaciones; dependencia de herramientas externas como FTP. | 3 |
| Visibilidad del estado del sistema | Falta de indicadores de progreso en carga de archivos o envío de correos internos. | 2 |
| Control y libertad del usuario | Ausencia de deshacer; falta de guardado automático; gestión de grupos poco intuitiva. | 2 |
| Reconocer antes que recordar | Dificultad para localizar funciones específicas, como la creación o gestión de grupos. | 2 |
| Ayuda a reconocer, diagnosticar y recuperarse de errores | Mensajes que aparecen cuando el error ya se ha producido, en lugar de prevenirlo. | 2 |
| Ayuda y documentación | Tutorial básico; falta de diferenciación por perfiles; inconsistencias terminológicas entre ayuda e interfaz. | 2 |
| Consistencia y estándares | Diferentes tipos de botones; variaciones visuales en servicios integrados de la UPV; comportamiento móvil irregular. | 1 |

Los problemas críticos se relacionan principalmente con la dificultad para alinear el lenguaje, la organización de la información y la presentación visual de la plataforma con las expectativas propias del contexto académico. En la heurística de correspondencia entre el sistema y el mundo real, los indicios más relevantes son el uso de denominaciones poco transparentes para parte del usuario, como “sitio”, la presencia de iconos cuya función no siempre resulta evidente y una organización del menú lateral que no sigue de forma constante la lógica de las tareas habituales de alumnado y profesorado. En un LMS, estas decisiones no son solo cuestiones terminológicas: condicionan la forma en que el usuario interpreta la estructura del entorno, anticipa dónde encontrará una herramienta y decide qué ruta debe seguir para completar una acción. Cuando la interfaz obliga a traducir mentalmente conceptos del sistema a conceptos académicos, aumenta la probabilidad de duda, exploración innecesaria y pérdida de orientación. Por ello, estas incidencias afectan directamente a la construcción de un modelo mental estable sobre la plataforma [2], [4].

En relación con el diseño estético y minimalista, se observó una elevada densidad de opciones, accesos y elementos informativos en pantalla. Esta sobrecarga puede reducir la visibilidad de las acciones principales y aumentar el esfuerzo necesario para identificar qué debe hacer el usuario en cada momento. El problema no reside únicamente en que la plataforma incorpore muchas funciones, algo esperable en un entorno institucional que debe atender docencia, comunicación, evaluación y gestión de materiales. La dificultad aparece cuando esas funciones se muestran con una jerarquía insuficiente y con una separación poco clara entre acciones principales, secundarias y administrativas. En esas condiciones, tareas frecuentes como localizar un recurso, acceder a una actividad, revisar una comunicación o modificar una configuración pueden requerir más inspección visual de la necesaria. Desde los principios de usabilidad, un diseño más minimalista no implicaría eliminar funcionalidades, sino ordenar la información según prioridad, frecuencia de uso y contexto de tarea [4], [8].

Las incidencias graves se vinculan con la prevención de errores y la flexibilidad de uso. En el primer caso, se detectaron situaciones en las que el sistema no advierte suficientemente sobre posibles pérdidas de información, configuraciones incorrectas o acciones críticas. Este aspecto es especialmente relevante en una plataforma académica, porque algunas acciones pueden tener consecuencias directas sobre entregas, disponibilidad de materiales, comunicación con estudiantes o configuración de espacios docentes. La prevención de errores debería actuar antes de que el problema se produzca, mediante mensajes claros, restricciones comprensibles, confirmaciones en operaciones sensibles y señales visibles sobre el estado de una acción. En el segundo caso, la flexibilidad de uso aparece limitada por procesos poco configurables, personalización reducida y dependencia de herramientas externas en determinadas tareas. Estas limitaciones pueden afectar con mayor intensidad a usuarios frecuentes, que necesitan repetir operaciones de forma eficiente y que podrían beneficiarse de accesos directos, configuraciones persistentes y flujos menos fragmentados [4], [7].

Finalmente, las heurísticas con severidad moderada o leve muestran problemas menos críticos, pero relevantes para la experiencia global. La falta de indicadores de progreso en acciones como la carga de archivos o el envío de comunicaciones internas puede generar incertidumbre sobre si el sistema está respondiendo correctamente. Del mismo modo, la ausencia de mecanismos claros de deshacer, la dificultad para localizar algunas funciones específicas y las inconsistencias entre la ayuda disponible y la terminología de la interfaz pueden reducir la percepción de control del usuario. Estas

incidencias no bloquean necesariamente el uso de PoliformaT, pero sí incrementan el esfuerzo cognitivo y pueden hacer que tareas aparentemente simples se perciban como más complejas. Su importancia reside en su carácter acumulativo: un problema aislado puede ser asumible, pero la suma de pequeñas fricciones en tareas repetidas puede deteriorar la eficiencia y la satisfacción de uso definidas en la noción de usabilidad [5].

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que los principales problemas de usabilidad de PoliformaT no se limitan a aspectos visuales puntuales, sino que afectan a dimensiones estructurales de la experiencia de uso. Las incidencias críticas en la correspondencia entre el sistema y el mundo real y en el diseño estético y minimalista indican dificultades relacionadas con el lenguaje empleado, la organización conceptual de la información y la jerarquización de acciones. Estos problemas pueden interferir en la construcción de modelos mentales coherentes, especialmente cuando los usuarios deben interpretar términos poco alineados con el contexto académico o localizar funciones dentro de una estructura de navegación densa [2], [4].

La sobrecarga visual y la exposición simultánea de múltiples opciones refuerzan esta dificultad. Desde la perspectiva de la experiencia de usuario, un LMS no solo debe ofrecer herramientas funcionales, sino facilitar que alumnado y profesorado comprendan qué pueden hacer, dónde deben hacerlo y qué consecuencias tienen sus acciones. En este sentido, los problemas detectados pueden incrementar el esfuerzo cognitivo necesario para completar tareas habituales, reducir la eficiencia de navegación y afectar a la percepción de control del usuario [5], [8].

Las incidencias graves en prevención de errores y flexibilidad de uso apuntan también a áreas prioritarias de mejora. La ausencia de avisos suficientes ante acciones críticas, la falta de mecanismos de confirmación o recuperación y la limitada personalización de algunos procesos pueden afectar especialmente a usuarios frecuentes. En plataformas académicas, donde determinadas tareas se repiten de forma periódica, la posibilidad de anticipar errores, simplificar flujos y adaptar ciertas configuraciones resulta clave para mejorar la eficiencia y la satisfacción de uso [4], [7].

Como conclusión, este estudio confirma la utilidad de la evaluación heurística como método diagnóstico inicial para analizar la usabilidad de entornos virtuales de aprendizaje. Su aplicación a PoliformaT ha permitido identificar problemas prioritarios y formular recomendaciones orientadas a mejorar la claridad terminológica, la jerarquía visual, la prevención de errores y la eficiencia de los flujos de interacción [3], [9]. No obstante, al tratarse de una evaluación experta individual, los resultados deben interpretarse como una primera aproximación. Futuras investigaciones deberían complementar estos hallazgos con pruebas con usuarios, diferenciando perfiles de alumnado y profesorado, para contrastar el impacto real de las incidencias detectadas en tareas académicas concretas [9], [10].

## REFERENCIAS

[1] H. Coates, R. James, and G. Baldwin, “A critical examination of the effects of learning management systems on university teaching and learning,” *Tertiary Education and Management*, vol. 11, no. 1, pp. 19–36, Jan. 2005, doi: 10.1080/13583883.2005.9967137.

[2] Dedre. Gentner and A. L. . Stevens, *Mental models*. Psychology Press, 2014.

[3] J. Nielsen and R. Molich, “Heuristic evaluation of user interfaces,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pp. 249–256, Mar. 1990, doi: 10.1145/97243.97281.
[4] J. Nielsen, “Enhancing the explanatory power of usability heuristics,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pp. 152–158, 1994, doi: 10.1145/191666.191729/ASSET/748A0827-53F6-42AC-BD7C-734DC7B83092/ASSETS/191666.191729.FP.PNG.
[5] International Organization for Standardization, “ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts,” Geneva, Switzerland, 2018. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/63500.html
[6] I. Maslov, S. Nikou, and P. Hansen, “Exploring user experience of learning management system,” *International Journal of Information and Learning Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 344–363, 2021, doi: 10.1108/IJILT-03-2021-0046.
[7] Jakob. Nielsen, *Usability engineering*. Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
[8] William. Lidwell, Kritina. Holden, and Jill. Butler, *Universal principles of design*. Rockport Publishers, 2010.
[9] Jakob. Nielsen and R. L. . Mack, *Usability inspection methods*. Wiley, 1994.
[10] K. Moran and K. Gordon, “Heuristic Evaluations: How to Conduct - NN/G.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://www.nngroup.com/articles/how-to-conduct-a-heuristic-evaluation/

# Aplicación del *Pallet Building Problem* a la optimización de rutas de *picking*

**Jordá, Ignacio[(1)], Garrido, Neus [(2)], Juan, Ángel A.[(3)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València*
igjormo@alumni.upv.es
*(2) Instituto de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València,*
neugarsa@mat.upv.es
*(3) CIGIP, Universitat Politècnica de València, ajuanp@upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo explora la aplicación de estructuras derivadas del *Pallet Building Problem* (PBP) al problema de preparación de pedidos y optimización de rutas de *picking* descrito por Neroni. La propuesta se basa en una construcción jerárquica de pallets mediante capas *Single-Item* (SI), *Single-Family* (SF) y *Residual Layers* (RL), transformando parcialmente el problema de *routing* en un proceso estructurado de construcción geométrica.

La metodología combina heurísticas de generación de capas, consolidación residual y asignación de pallets considerando simultáneamente criterios geométricos y logísticos. Las capas SI y SF generan configuraciones compactas y coherentes, mientras que las RL aportan flexibilidad al integrar elementos residuales.

Los resultados preliminares muestran soluciones cercanas a 3,25 pallets por instancia, con distancias medias de *picking* del orden de 15.500 unidades. Esto supone una mejora aproximada del 7% en el número de pallets respecto al método de referencia, aunque con una penalización cercana al 19% en distancia. No obstante, la propuesta mejora simultáneamente los métodos alternativos considerados.

En conjunto, la estrategia SI–SF–RL se presenta como una vía prometedora para reducir la complejidad combinatoria y generar soluciones equilibradas entre compactación física y eficiencia logística.

**Palabras clave:** *pallet building problem, case picking, order picking*, logística, heurísticas, *pallet loading, warehouse optimization*.

## INTRODUCCIÓN

La optimización de operaciones logísticas en almacenes constituye actualmente uno de los principales retos dentro de los sistemas modernos de distribución y preparación de pedidos. El crecimiento del comercio electrónico, la reducción del tamaño medio de los pedidos y la necesidad de incrementar la velocidad de servicio han provocado un aumento significativo de la complejidad operativa en los procesos de *picking* y construcción de pallets [1,2].

Tradicionalmente, los problemas de preparación de pedidos y los problemas de construcción de pallets han sido abordados de forma independiente. Por un lado, la literatura relacionada con *order picking* se ha centrado principalmente en la optimización

de rutas, secuenciación de recogidas y estrategias de agrupación de pedidos. Por otro lado, los problemas de *pallet loading* y *pallet building* han estudiado la organización geométrica de productos dentro de pallets considerando restricciones físicas como estabilidad, soporte vertical, capacidad de carga y resistencia estructural de los productos [6].

Sin embargo, esta separación entre *routing* y *palletización* genera importantes ineficiencias operativas. Una solución geométricamente eficiente puede provocar recorridos excesivos durante el *picking*, mientras que una solución optimizada únicamente desde el punto de vista de las rutas puede conducir a configuraciones físicamente inestables o difíciles de construir en un entorno industrial real. Como consecuencia, durante los últimos años ha surgido un creciente interés por enfoques integrados capaces de considerar simultáneamente ambos aspectos.

En este contexto, Neroni et al. introdujeron el denominado *Three-Dimensional Case Picking Problem* (3D-CPP), integrando conjuntamente el *routing* de *pickers* y la construcción tridimensional de pallets bajo restricciones físicas realistas como soporte vertical, capacidad de carga y limitaciones de resistencia entre productos. Su metodología demostró que la integración entre *routing* y *packing* puede reducir significativamente las distancias recorridas por los operarios manteniendo configuraciones físicamente viables [3].

Paralelamente, los trabajos de Calzavara, Iori y colaboradores sobre el *constrained Pallet Building Problem* (PBP) han propuesto metodologías jerárquicas basadas en la generación estructurada de capas, incorporando restricciones adicionales de contigüidad y visibilidad entre familias de productos. Estos enfoques han mostrado una elevada capacidad para generar configuraciones compactas y estructuralmente robustas en escenarios industriales complejos [4,5].

No obstante, muchas de las restricciones consideradas en el *constrained* PBP responden a requerimientos de agrupación visual o cohesión geométrica más que a necesidades operativas del proceso de *picking*. En particular, las restricciones de contigüidad y visibilidad incrementan considerablemente la complejidad combinatoria y reducen la flexibilidad de construcción de las soluciones.

Desde el punto de vista de la preparación de pedidos, estas restricciones no siempre resultan estrictamente necesarias. En numerosos entornos industriales, el aspecto crítico es garantizar la estabilidad estructural del pallet, la viabilidad física de la carga y una organización suficientemente coherente para permitir operaciones eficientes de *picking*.

A partir de esta observación, el presente trabajo explora la adaptación parcial de las estructuras jerárquicas del *constrained* PBP al problema integrado de *picking* y construcción de pallets planteado por Neroni et al. [3]. En particular, la propuesta elimina las restricciones explícitas de contigüidad y visibilidad entre familias, manteniendo únicamente aquellas relacionadas directamente con la estabilidad estructural y la viabilidad física del pallet [6].

Adicionalmente, el enfoque propuesto permite reinterpretar parcialmente el problema de *routing* como un proceso estructurado de construcción geométrica basado en capas,

facilitando la generación de soluciones más organizadas y manejables desde el punto de vista combinatorio.

Para ello, el modelo conserva las restricciones de soporte vertical mediante un criterio mínimo de soporte superficial entre capas consecutivas. En particular, únicamente aquellas capas que alcanzan un soporte efectivo superior a un factor α = 0.55 pueden actuar como capas estructurales base. Cuando una capa no alcanza dicho umbral, pasa automáticamente a considerarse una *Residual Layer* (RL), restringiéndose su ubicación a la parte superior del pallet.

Esta simplificación permite preservar las ventajas estructurales de la construcción jerárquica por capas, reduciendo simultáneamente la rigidez del modelo y la complejidad asociada a las formulaciones más restrictivas del *constrained* PBP. Al mismo tiempo, se mantiene la filosofía integrada del 3D-CPP orientada a la reducción de distancias de *picking* y a la generación de configuraciones compatibles con entornos logísticos reales.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la viabilidad de utilizar estructuras derivadas del *Pallet Building Problem* (PBP) como aproximación al problema integrado de preparación de pedidos y construcción de pallets planteado en el *Three-Dimensional Case Picking Problem* (3D-CPP) de Neroni et al. [3].

En particular, se estudia si es posible obtener soluciones de calidad comparable mediante un enfoque jerárquico basado en descomposición, evitando la resolución directa del problema tridimensional integrado, caracterizado por su elevada complejidad computacional.

Para ello, la propuesta adapta la filosofía de construcción por capas del *constrained* PBP [4,5], simplificando el modelo mediante la eliminación de restricciones de contigüidad y visibilidad entre familias de productos, y reteniendo únicamente aquellas necesarias para garantizar estabilidad estructural y viabilidad física [6].

La metodología resultante descompone el problema tridimensional en una secuencia de decisiones estructuradas basadas en capas *Single-Item* (SI), *Single-Family* (SF) y *Residual Layers* (RL), siguiendo un enfoque inspirado en los trabajos de Calzavara e Iori [4,5], con el objetivo de reducir la complejidad combinatoria manteniendo configuraciones coherentes.

Asimismo, el modelo incorpora un criterio mínimo de soporte estructural basado en un factor α = 0.55 para determinar la validez de las capas como elementos base.

Finalmente, el trabajo analiza si esta aproximación permite alcanzar un equilibrio adecuado entre eficiencia logística y calidad estructural, evaluando su impacto tanto en el número de pallets como en las distancias de *picking*.

## METODOLOGIA

La metodología propuesta se basa en una construcción jerárquica de pallets mediante capas *Single-Item* (SI), *Single-Family* (SF) y *Residual Layers* (RL), adaptando la filosofía estructural del *Pallet Building Problem* al contexto del *Three-Dimensional Case Picking Problem*. Este enfoque permite transformar parcialmente el problema tridimensional integrado en una secuencia de decisiones bidimensionales estructuradas, reduciendo así su complejidad computacional.

La generación de capas se realiza mediante procedimientos heurísticos de empaquetado geométrico bidimensional, apoyados por heurísticas de selección de ítems orientadas tanto a la viabilidad geométrica como a la coherencia logística de las agrupaciones generadas [7,8].

Las capas SI y SF actúan como estructuras principales de construcción, permitiendo generar configuraciones compactas y estructuralmente estables. Los elementos residuales se integran posteriormente mediante capas RL, restringidas a posiciones superiores dentro del pallet.

El modelo incorpora restricciones de estabilidad basadas en soporte superficial entre capas consecutivas, utilizando un factor mínimo de soporte $\alpha = 0.55$ para determinar qué capas pueden actuar como base estructural. Aquellas capas que no alcanzan este umbral son clasificadas como RL y limitadas a posiciones superiores.

En conjunto, la metodología descompone el problema en tres fases principales: (I) generación de capas bidimensionales, (II) clasificación estructural de capas en SI, SF y RL, y (III) asignación de capas a pallets.

Finalmente, las capas generadas se asignan a pallets considerando simultáneamente criterios geométricos y de distancia de *picking*, permitiendo evaluar el impacto del enfoque en términos de compactación física y eficiencia logística.

## RESULTADOS

Los resultados preliminares obtenidos con la metodología propuesta muestran soluciones cercanas a 3,28 pallets por instancia y una distancia total de *picking* próxima a 15.500 unidades de recorrido. Estos valores permiten comparar el comportamiento del enfoque SI–SF–RL con los resultados publicados por Neroni et al. para el *Three-Dimensional Case Picking Problem*.

A partir de la Tabla 3 de Neroni et al., el método utilizado por la empresa requiere un total de 115 pallets en 21 instancias, con una media de 5,48 pallets por instancia y una distancia total de 22.476 unidades. El método secuencial reduce estos valores hasta 77 pallets y 19.276 unidades de recorrido, mientras que el método integrado propuesto por Neroni et al. alcanza 74 pallets y una distancia total de 13.048 unidades.

En comparación con dichos resultados, la metodología propuesta en este trabajo obtiene una reducción del número medio de pallets hasta aproximadamente 3,25 por instancia, lo que representa una mejora cercana al 7,7% respecto al método de Neroni et al., del 11,4% respecto al método secuencial y superior al 40% respecto al método utilizado por la empresa.

No obstante, esta mejora en compactación física se obtiene todavía con una penalización parcial en distancia respecto al método integrado de Neroni et al. La distancia total estimada de 15.500 unidades supone un incremento aproximado del 18,8% respecto a las 13.048 unidades reportadas por dichos autores. Aun así, la propuesta sí mejora claramente los dos métodos alternativos considerados, reduciendo aproximadamente un 19,6% la distancia respecto al método secuencial y alrededor de un 31% respecto al método utilizado por la empresa.

**Tabla 1.** Comparación de resultados frente a los métodos de Neroni et al.

| Método | Pallets totales | Pallets medios | Distancia total |
|---|---|---|---|
| Método empresa (C) | 115 | 5,48 | 22476 |
| Método secuencial (S) | 77 | 3,67 | 19276 |
| Método Neroni (P) | 74 | 3,52 | 13048 |
| **Método propuesto** | 69 | 3,28 | 15550 |

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad de aproximar el problema integrado de case *picking* mediante una descomposición jerárquica basada en estructuras derivadas del *Pallet Building Problem*. La estrategia basada en capas SI–SF–RL muestra una elevada capacidad para generar configuraciones compactas y estructuralmente coherentes, alcanzando valores de 3,25 pallets por instancia.

El análisis comparativo evidencia la existencia de un compromiso entre compactación física y eficiencia logística. La metodología propuesta reduce de forma significativa el número de pallets respecto a los métodos analizados por Neroni et al. [3], manteniendo distancias de *picking* razonables, aunque todavía superiores al método integrado. No obstante, se mejora simultáneamente el comportamiento de los enfoques empresa y secuencial.

Desde el punto de vista computacional, los resultados obtenidos sugieren que la descomposición jerárquica permite reducir la complejidad del problema, evitando la resolución directa del modelo tridimensional integrado. Este comportamiento refuerza las ideas planteadas por Calzavara et al. [4,5] sobre el uso de estructuras intermedias como mecanismo de simplificación combinatoria.

Asimismo, la eliminación de restricciones de contigüidad y visibilidad no deteriora de forma significativa la calidad logística de las soluciones, incrementando la flexibilidad geométrica y favoreciendo la obtención de configuraciones más compactas.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto el potencial de las metodologías basadas en descomposición estructurada como alternativa eficiente a los enfoques tridimensionales integrados. Como línea futura, se propone reforzar la componente logística del modelo mediante la incorporación explícita de criterios de proximidad y distancia durante las fases de construcción y asignación de capas a pallets.

## REFERENCIAS

[1] Silva, E.; Oliveira, J.F.; Wäscher, G. (2016). "The pallet loading problem: a review of solution methods and computational experiments". International Transactions in Operational Research, v. 23, n. 1-2, p.p. 147-172.

[2] Wäscher, G.; Haußner, H.; Schumann, H. (2007). "An improved typology of cutting and packing problems". European Journal of Operational Research, v. 183, n. 3, p.p. 1109-1130.

[3] Neroni, M.; Juan, A.A.; Bertolini, M. (2024). "A multistart biased-randomized algorithm for solving a three-dimensional case picking problem with real-life constraints". International Transactions in Operational Research, v. 31, n. 4, p.p. 2154-2177.

[4] Calzavara, G.; Iori, M.; Locatelli, M.; Moreira, M.C.O.; Silveira, T. (2025). "Mathematical models and heuristic algorithms for pallet building problems with practical constraints". Annals of Operations Research, v. 350, n. 1, p.p. 5-36.

[5] Iori, M.; Locatelli, M.; Moreira, M.C.O.; Silveira, T. (2020). "A mixed approach for pallet building problem with practical constraints". En: International Conference on Enterprise Information Systems, p.p. 122-139.

[6] Bischoff, E.E. (1991). "Stability aspects of pallet loading". Operations-Research-Spektrum, v. 13, n. 4, p.p. 189-197.

[7] Crainic, T.G.; Perboli, G.; Tadei, R. (2008). "Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing". INFORMS Journal on Computing, v. 20, n. 3, p.p. 368-384.

[8] Herbert, E.A.; Dowsland, K.A. (1996). "A family of genetic algorithms for the pallet loading problem". Annals of Operations Research, v. 63, n. 3, p.p. 415-436.

# Realidad virtual (RV) adaptativa para autismo (TEA): diagnóstico mediante agente conversacional (IA) y creación automática de escenarios

**Francés-Falip, Aitana[(1)], Solanes Galbis, J.Ernesto[(2)], Linares Pellicer, Jordi[(3)]**

*(1) Tecnologías Digitales Integradas, Instituto Tecnológico de Producto Infantil y Ocio (AIJU), Av. Industria 23, aitanafrances@aiju.es; ORCID 0009-0006-9418-9968*
*(2) Instituto de Diseño y Fabricación, Universitat Politècnica de València, València. juasogal@isa.upv.es, ORCID 0000-0001-5011-4872*
*(3) VRAIN, Dpto. de Sistemas Informáticos y Computación, Universitat Politècnica de València, València, jorlipel @ upv.es, ORCID 0000-0002-3315-1716*

## RESUMEN

La presente ponencia expone un desarrollo de realidad virtual adaptativa aplicada al trastorno del espectro autista (TEA), basada en la integración de un agente conversacional de inteligencia artificial y un sistema de generación automática de escenarios personalizados.

El agente mantiene una interacción natural, estructurada y no invasiva para recoger información sobre comunicación social, flexibilidad conductual, intereses restringidos, sensibilidad sensorial y posibles estrategias de camuflaje. A partir de estos datos, y siempre bajo supervisión profesional, el sistema organiza evidencias y genera un perfil preliminar de necesidades de apoyo. Sobre la base de las carencias detectadas, el asistente propone actividades específicas de intervención o entrenamiento, que pueden transformarse automáticamente en código para *Unity*, preparado para su integración en entornos de realidad virtual y su posterior carga en gafas VR.

Así, el perfil generado permite crear experiencias inmersivas personalizadas para trabajar situaciones sociales, cambios de rutina, estímulos sensoriales o habilidades comunicativas en entornos seguros y progresivos. La propuesta no pretende sustituir la evaluación clínica o psicopedagógica, sino complementarla mediante una solución tecnológica que facilite la observación inicial, la personalización de experiencias y la toma de decisiones profesional.

**Palabras clave:** realidad virtual, agente conversacional, inteligencia artificial, trastorno del espectro autista, escenarios personalizados, necesidades de apoyo.

## INTRODUCCIÓN

El trastorno del espectro autista (TEA) constituye una condición del neurodesarrollo caracterizada por dificultades en la comunicación e interacción social, junto con patrones restringidos y repetitivos de comportamiento, intereses o actividades. Además, su manifestación es heterogénea, por lo que los rasgos asociados pueden variar entre personas, contextos y momentos evolutivos [1]. Esta variabilidad puede dificultar la identificación temprana de necesidades de apoyo, especialmente cuando existen estrategias de camuflaje social o masking, mediante las cuales la persona oculta, compensa o disimula determinados rasgos para adaptarse a entornos neurotípicos [2].

Los procedimientos actuales de evaluación y cribado se apoyan en instrumentos consolidados, como el ADOS-2, el AQ, el RAADS-R o el CAT-Q, que permiten estructurar la observación de dimensiones relacionadas con la comunicación social, la flexibilidad conductual, los intereses restringidos, la sensibilidad sensorial y el camuflaje [3]. No obstante, estos recursos pueden presentar limitaciones en términos de tiempo, especialización requerida, dependencia del autorreporte o dificultad para captar la complejidad de la interacción en contextos cotidianos [4]. En consecuencia, resulta necesario explorar herramientas complementarias que faciliten una primera aproximación accesible y supervisada a la detección de posibles necesidades de apoyo.

En los últimos años, la inteligencia artificial ha abierto nuevas posibilidades en el ámbito de la evaluación asistida por tecnología, al permitir interacciones naturalistas, adaptativas y poco invasivas [5]. Un agente conversacional puede recoger información relevante no solo a partir de lo que la persona responde, sino también observando cómo organiza el discurso, cómo gestiona la reciprocidad comunicativa, qué temas desarrolla con mayor intensidad o qué dificultades emergen ante cambios, ambigüedad o estímulos sensoriales. Sin embargo, su uso debe plantearse siempre desde una perspectiva prudente, ética y no diagnóstica, con supervisión profesional y como complemento a la evaluación clínica o psicopedagógica [6].

Sobre esta base, la presente propuesta incorpora la realidad virtual (RV) adaptativa como un segundo nivel de intervención tecnológica, orientado a transformar la información obtenida durante la evaluación conversacional en experiencias inmersivas personalizadas. La RV ha mostrado potencial como herramienta de apoyo para trabajar habilidades sociales, cognitivas y emocionales en personas con TEA dentro de entornos seguros, controlados y graduables [7[. A partir de las carencias o áreas de mejora detectadas por el agente conversacional, el sistema propone actividades específicas y las transforma automáticamente en código para Unity, preparado para su integración en entornos inmersivos y su carga en gafas de realidad virtual. De este modo, la información recogida durante la interacción no queda limitada a un informe descriptivo, sino que se traduce en escenarios personalizados para trabajar carencias detectadas.

La innovación de la propuesta no reside en sustituir la labor del profesional, sino en ampliar sus herramientas mediante un sistema capaz de observar, organizar evidencias, proponer actividades y generar experiencias inmersivas individualizadas.

## OBJETIVOS

El objetivo general del desarrollo es diseñar un sistema de realidad virtual adaptativa orientado al apoyo de personas con trastorno del espectro autista (TEA), mediante la integración de un agente conversacional basado en inteligencia artificial y un módulo de generación automática de escenarios inmersivos en *Unity*.

Como objetivos específicos, se plantean los siguientes:

a) Diseñar un agente conversacional de inteligencia artificial para la identificación de necesidades de apoyo, capaz de mantener una interacción natural, estructurada y no invasiva, y recoger información sobre comunicación social, flexibilidad conductual, intereses, sensibilidad y estrategias de camuflaje.

b) Organizar la información obtenida en un perfil individual revisable por profesionales, incorporando evidencias observables, niveles de confianza, áreas de mejora y limitaciones interpretativas, de manera que el sistema actúe como apoyo a la observación inicial y no como instrumento diagnóstico autónomo.

c) Generar actividades a partir de las necesidades detectadas, orientadas al entrenamiento de habilidades sociales, comunicación funcional, tolerancia a cambios de rutina, gestión sensorial y adaptación a situaciones cotidianas.

d) Automatizar la creación de escenarios de realidad virtual en *Unity*, transformando las actividades propuestas en código preparado para su integración en gafas VR y permitiendo configurar entornos inmersivos seguros, progresivos y adaptados al perfil de cada persona usuaria.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos se organizan en tres áreas principales, correspondientes a los componentes funcionales del sistema desarrollado.

### ASISTENTE CONVERSACIONAL

Uno de los principales resultados obtenidos es el desarrollo de un asistente conversacional basado en inteligencia artificial, denominado *CASSA* (*Conversational Autism Spectrum Screening Agent*), orientado a la identificación temprana de rasgos asociados al trastorno del espectro autista mediante una interacción naturalista, adaptativa y supervisada. El sistema no se plantea como un cuestionario cerrado ni como una prueba diagnóstica autónoma, sino como una herramienta de apoyo capaz de recoger evidencias conversacionales, organizarlas por dominios y facilitar su posterior revisión por profesionales cualificados. El agente debe actuar como una herramienta de cribado o evaluación preliminar, no como un instrumento diagnóstico independiente, y sus resultados requieren siempre interpretación profesional.

El funcionamiento del asistente se basa en una arquitectura organizada en tres fases: establecimiento de *rapport*, exploración de dominios y profundización adaptativa. En la primera, el agente genera un clima de confianza mediante preguntas abiertas y temas cotidianos, observando el estilo comunicativo inicial y la reciprocidad. En la segunda, introduce de forma natural áreas relevantes asociadas al TEA, como comunicación social, flexibilidad, intereses restringidos y sensibilidad sensorial, analizando tanto el contenido de las respuestas como la dinámica del intercambio. En la tercera, profundiza en los aspectos que muestran mayor relevancia, ajustando la conversación a los patrones detectados y evitando una secuencia rígida de preguntas.

El asistente incorpora un sistema interno de seguimiento en tiempo real. Esta capa solo es visible para el profesional responsable de la sesión, y permite registrar evidencias por dominios y mantener una separación entre la capa conversacional visible y la capa interna de observación. También incorpora campos específicos para anotar indicadores de camuflaje y observaciones sobre impacto funcional o nivel de apoyo estimado.

La puntuación se realiza mediante una escala criterial de 0 a 3. Esta puntuación se acompaña de evidencias observadas y de un nivel de confianza, de forma que el resultado no se presenta como una conclusión automática, sino como una estimación preliminar sujeta a revisión. Además, el propio sistema reconoce cuándo determinados criterios no pueden valorarse adecuadamente a través de una conversación textual, especialmente aquellos relacionados con comunicación no verbal o movimientos repetitivos.

**Tabla 1.** Escala de puntuación del asistente conversacional.

| Puntuación | Interpretación | Descripción |
|---|---|---|
| 0 | Sin evidencia significativa | No se observan indicios relevantes en el dominio evaluado durante la conversación. |
| 1 | Indicios sutiles u ocasionales | Se identifican señales leves, poco consistentes o sin impacto funcional claro. |
| 2 | Indicadores claros | Aparecen evidencias consistentes asociadas al dominio evaluado, con impacto funcional moderado. |
| 3 | Indicadores prominentes | Los indicios son frecuentes o intensos y muestran una interferencia significativa en el funcionamiento de la persona. |
| No valorable | Información insuficiente | El criterio no puede evaluarse adecuadamente mediante conversación textual, especialmente en comunicación no verbal, movimientos repetitivos o historia evolutiva completa. |

El modelo considera, además, una formulación matemática del proceso de observación, expresado como:

$$x_m(t) = h_m(z(t) + e\ (t))$$

En esta formulación, $x_m(t)$ representa los datos observados en un momento determinado de la interacción, $z(t)$ se interpreta como el estado o fenotipo estimado latente de la persona, hm corresponde a una proyección no lineal que relaciona ese estado latente con las manifestaciones observables, y $e(t)$ representa el ruido del modelo, es decir, la variabilidad o error asociado a factores contextuales, emocionales o de disponibilidad de información. Los síntomas pueden variar según el momento de observación debido a factores como el estado anímico, el estrés o la predisposición, lo que condiciona el diagnóstico y justifica la necesidad de un enfoque dinámico basado en trayectoria. Este modelo permite conceptualizar la conversación como una fuente de datos observables que no refleja directamente el estado interno de la persona, sino una manifestación parcial y variable de este. Por ello, el sistema no interpreta una respuesta aislada como evidencia concluyente, sino que acumula señales a lo largo del intercambio. La robustez del modelo se apoya en la posibilidad de recuperar el estado latente a pesar del ruido, cuantificar la pérdida de información cuando faltan modalidades de observación y acotar el riesgo fuera de dominio. En la práctica, esta aproximación justifica que el asistente combine evidencias verbales, patrones discursivos, consistencia de respuestas, indicadores funcionales y niveles de confianza antes de generar una salida interpretativa.

## DIAGNÓSTICO ASISTIDO Y RECOMENDACIÓN DE ACTIVIDADES

El sistema genera un informe de diagnóstico asistido, concebido como apoyo a la valoración profesional y no como un diagnóstico clínico autónomo. Tras la conversación, la información se organiza en dimensiones relacionadas con las capacidades del usuario, como reciprocidad social, comunicación, relaciones interpersonales, flexibilidad, intereses restringidos y sensibilidad sensorial. Cada dimensión recibe una puntuación orientativa generada por la IA, que se compara con la puntuación otorgada por el profesional para identificar coincidencias, discrepancias y áreas que requieren revisión. El informe justifica cada valoración mediante evidencias concretas extraídas de la interacción, como fragmentos verbales, patrones de respuesta, baja reciprocidad conversacional, dificultad ante cambios, referencias a estímulos sensoriales o recurrencia de determinados temas. De este modo, la salida no se limita a una

puntuación numérica, sino que explica qué elementos sustentan la interpretación realizada.

A partir de estos resultados, el sistema identifica las carencias clave o áreas prioritarias de trabajo y propone actividades de intervención o entrenamiento. Estas actividades pueden orientarse al desarrollo de habilidades sociales, comunicación funcional, tolerancia a cambios de rutina, gestión sensorial o flexibilidad cognitiva. Finalmente, dichas propuestas sirven como base para la generación posterior de escenarios de realidad virtual, manteniendo siempre la supervisión y validación del profesional.

## REALIDAD VIRTUAL AUTOGENERADA

El módulo de realidad virtual constituye la fase final del sistema y permite transformar las necesidades detectadas por el asistente conversacional en escenarios inmersivos personalizados. Para ello, la IA parte de una estructura de código preestablecida en *Unity*, diseñada como una plantilla parametrizable. Esta plantilla contiene un conjunto de variables que pueden modificarse automáticamente en función del perfil del usuario, de las carencias identificadas y de las actividades recomendadas por el sistema.

El funcionamiento se basa en la separación entre la lógica fija del escenario y los elementos adaptativos. La lógica fija incluye la estructura general del entorno, la navegación básica, la interacción con objetos, el sistema de instrucciones, los eventos de inicio y finalización, y la compatibilidad con gafas de realidad virtual. Sobre esta base, la IA rellena variables específicas que determinan cómo será la experiencia para cada usuario. Estas variables pueden afectar tanto a aspectos estéticos como funcionales, de este modo, si el sistema detecta sensibilidad sensorial, la IA puede generar un entorno con menor intensidad sonora, iluminación suave y exposición progresiva a estímulos. Si identifica dificultades en interacción social, puede crear una actividad con avatares que simulen conversaciones guiadas, turnos de palabra o reconocimiento de emociones.

**Tabla 2.** Variables de generación del escenario de realidad virtual en Unity.

| Tipo de variable | Ejemplos | Adaptación según perfil |
|---|---|---|
| Estética del entorno | Colores, iluminación, temática, objetos y ambientación. | Ajuste a preferencias, intereses específicos o sensibilidad visual. |
| Estímulos sensoriales | Sonido, volumen, luces, densidad visual, movimiento y ruido ambiental. | Reducción inicial o exposición progresiva según sensibilidad detectada. |
| Interacción social | Número de avatares, turnos, distancia interpersonal y tipo de respuesta. | Escenarios más simples o complejos según reciprocidad social y habilidades comunicativas. |
| Actividad propuesta | Objetivo, instrucciones, pasos, duración, ayudas y criterios de finalización. | Personalización según carencias detectadas y actividad recomendada por el asistente. |
| Nivel de dificultad | Ritmo, cantidad de estímulos, número de decisiones y criterios de avance. | Progresión gradual en función del desempeño, tolerancia y supervisión profesional. |

La generación del código permite que la actividad propuesta no quede únicamente descrita en texto, sino que se convierta en un escenario ejecutable y preparado para su carga en gafas VR. El resultado es un entorno inmersivo seguro, progresivo y ajustado al perfil individual, en el que el profesional puede supervisar la experiencia, modificar parámetros y validar la adecuación de la actividad antes de su uso.

## CONCLUSIONES

La propuesta plantea un sistema de RV adaptativa para personas con trastorno del espectro autista, basado en la combinación de un asistente conversacional de inteligencia artificial, un módulo de diagnóstico asistido, un sistema de recomendación de actividades y la generación automática de escenarios en *Unity*. Esta integración permite conectar la identificación de necesidades de apoyo con la creación de experiencias inmersivas personalizadas, orientadas al entrenamiento de habilidades sociales, comunicación funcional, flexibilidad ante cambios y gestión sensorial.

El asistente constituye el punto de partida del sistema, al permitir recoger información mediante una interacción natural, estructurada y no invasiva. A partir de las respuestas del usuario, el sistema puntúa distintas capacidades, justifica sus valoraciones mediante evidencias concretas y compara sus resultados con la valoración realizada por el profesional. De este modo, la IA actúa como una herramienta de apoyo a la observación y a la toma de decisiones, sin sustituir en ningún caso la interpretación experta.

Las carencias detectadas no se limitan a un informe descriptivo, sino que se traducen en actividades personalizadas. Estas actividades se convierten posteriormente en escenarios de realidad virtual mediante una plantilla de *Unity* parametrizable, cuyas variables son completadas automáticamente por la IA en función del perfil del usuario.

La propuesta busca herramientas más accesibles, personalizadas y supervisadas. No obstante, cabe seguir trabajando la validación con usuarios reales, evaluación por profesionales, análisis de usabilidad y estudios de seguridad antes de su aplicación.

## REFERENCIAS

[1] American Psychiatric Association (2022). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed., text rev.). Washington, DC: American Psychiatric Association Publishing. https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425787

[2] Cook, Julia; Hull, Laura; Crane, Laura; Mandy, William (2021). “Camouflaging in autism: A systematic review”. *Clinical Psychology Review*, v. 89, art. 102080. http://dx.doi.org/10.1016/j.cpr.2021.102080

[3] Curnow, Emma; Utley, Ian; Rutherford, Marion; Johnston, Lauren; Maciver, Donald (2023). “Diagnostic assessment of autism in adults: Current considerations in neurodevelopmentally informed professional learning with reference to ADOS-2”. *Frontiers in Psychiatry*, v. 14, art. 1258204. http://dx.doi.org/10.3389/fpsyt.2023.1258204

[4] Sturm, Alexandra; Huang, Sijia; Bal, Vanessa; Schwartzman, Ben (2024). “Psychometric exploration of the RAADS-R with autistic adults: Implications for research and clinical practice”. *Autism*, v. 28, n. 9, p.p. 2334-2345. http://dx.doi.org/10.1177/13623613241228329

[5] Li, Hongling; Zhang, Renwen; Lee, Yi-Chieh; Kraut, Robert E.; Mohr, David C. (2023). “Systematic review and meta-analysis of AI-based conversational agents for promoting mental health and well-being”. *npj Digital Medicine*, v. 6, art. 236. http://dx.doi.org/10.1038/s41746-023-00979-5

[6] Guo, Zhijun; Lai, Alvina; Thygesen, Johan H.; Farrington, Joseph; Keen, Thomas; Li, Kezhi (2024). “Large language models for mental health applications: Systematic review”. *JMIR Mental Health*, v. 11, art. e57400. http://dx.doi.org/10.2196/57400

[7] Mittal, Palka; Bhadania, Mahati; Tondak, Navya; Ajmera, Priyansh; Yadav, Shreya; Kukreti, Anupam; Kalra, Sanjay; Ajmera, Puneeta (2024). “Effect of immersive virtual reality-based training on cognitive, social, and emotional skills in children and adolescents with autism spectrum disorder: A meta-analysis of randomized controlled trials”. *Research in Developmental Disabilities*, v. 151, art. 104771. http://dx.doi.org/10.1016/j.ridd.2024.104771

# Producción fotocatalítica de hidrógeno con luz solar simulada a partir de disoluciones acuosas de glicerol utilizando materiales basados en UiO-66(Zr)

**Tejedor-García, Ana Athenea [1,2], Rueda-Navarro, Celia M., [2], Belén Ferrer [2], G. Baldoví, Herme [2], Dhakshinamoorthy, Amarajothi [2], Navalón, Sergio [2]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación Mixto de Tecnología Química Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, 46022, España. E-mail: antegar1@itq.upv.es*
*(2) Departamento de Química, Universitat Politècnica de València, C/Camino de Vera s/n, Valencia, 46022, España. E-mail: sernaol@doctor.upv.es*

## RESUMEN

Existe un interés cada vez mayor por el desarrollo de nuevas estrategias, tecnologías y materiales para la producción de hidrógeno como vector energético desde fuentes renovables con el objetivo de descarbonizar la atmósfera terrestre y mitigar las consecuencias del cambio climático. De este modo, en este trabajo se estudia la posibilidad de usar materiales híbridos metal-orgánicos de tipo MOF (MOF) que surgen como posibles fotocatalizadores activos para la generación de H2 tras el fotorreformado de glicerol procedente de fuentes renovables [1]. Los materiales presentes en el estudio incluyen algunos Zr-MOF de referencia como UiO-66(Zr)-X (X:H, NO2, NH2) o Ti-MOF de referencia como el MIL-125(Ti)-NH2. De entre todos estos, UiO-66(Zr)-NH2 presenta la mayor actividad fotocatalítica en la generación de H2, debiéndose a su mayor capacidad de absorber en el espectro de la luz visible y siendo sus niveles energéticos más favorables para el fotorreformado de glicerol.

**Palabras clave:** fotocatálisis heterogénea, glicerol, H2, UiO-66(Zr)

## INTRODUCCIÓN

La dependencia global de los combustibles fósiles representa un 80% de la energía mundial que se utiliza y conlleva la generación de contaminación, gases de efecto invernadero y el cambio climático [2]. Para paliar este problema, se plantea desarrollar vectores sostenibles como el hidrógeno $H_2$, ya que es idóneo por su alta densidad energética y nula huella de carbono. Sin embargo, el reformado de hidrocarburos con vapor, principal vía de producción en la actualidad presenta las desventajas de requerir un elevado aporte energético y el empleo de fuentes no renovables [3]. Por otro lado, la electrólisis es una alternativa limpia, pero sus elevados costes limitan su viabilidad masiva a nivel comercial [4]. La hidrólisis heterogénea fotoasistida por energía solar surge como una opción económica y simple a gran escala, pero requiere superar la baja eficiencia de los semiconductores inorgánicos tradicionales mediante nuevos materiales.

Los materiales híbridos metal-orgánicos tipo MOF son candidatos idóneos debido a su alta porosidad, elevada área superficial, gran variedad de estructuras, estabilidad (térmica, mecánica, química y electrónica) [5-7]. Para evitar el uso de reactivos costosos que limitan su viabilidad económica, el fotorreformado de biomasa o subproductos como el glicerol (residuo del 10% p/p en la producción de biodiésel) representa una solución doblemente sostenible [8].

Los materiales planteados como objeto de estudio se corresponden con la familia del UiO-66 basado en zirconio, en concreto, el conjunto UiO-66(Zr)-X donde X se corresponde con H, $NH_2$ y $NO_2$, permitiendo así estudiar la influencia de los diagramas de energía en la actividad fotocatalítica resultante. Además, se compara la actividad de estos materiales con el MOF de referencia MIL-125(Ti)-$NH_2$.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es obtener hidrógeno verde a partir de la irradiación de la luz solar simulada mediante materiales basados en el MOF UiO-66(Zr) con diferentes diagramas de energía [1].

## RESULTADOS

### Preparación y caracterización

Los MOFs fueron sintetizados siguiendo procesos solvotermales previamente descritos [9-10]. La difracción de rayos X confirmó que los materiales preparados tienen topología UiO-66 y MIL-125. Figura 1ab). Análisis termogravimétricos confirmaron que estos sólidos tienen una estabilidad térmica hasta los 350 ºC (Figura 2cd).

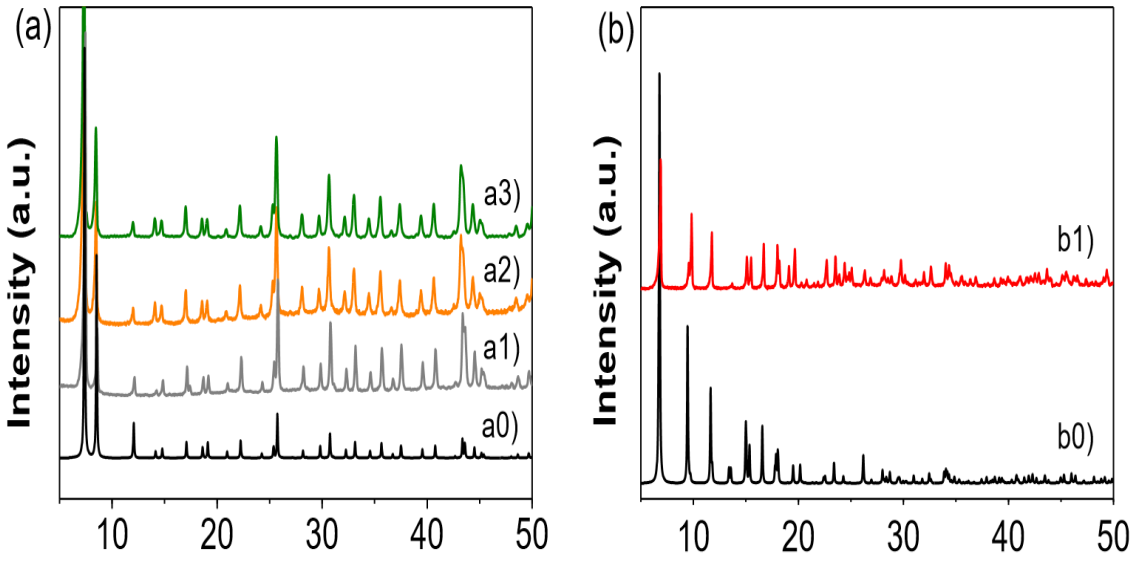



**Figura 1.** (a) Patrones de XRD del UiO-66(Zr) simulado (a0) y del UiO-66(Zr) experimental (a1), del UiO-66(Zr)-$NO_2$ (a2) y del UiO-66(Zr)-$NH_2$ (a3). (b) Patrones de XRD del MIL-125(Ti)-$NH_2$ simulado (b0) y experimental (b1).

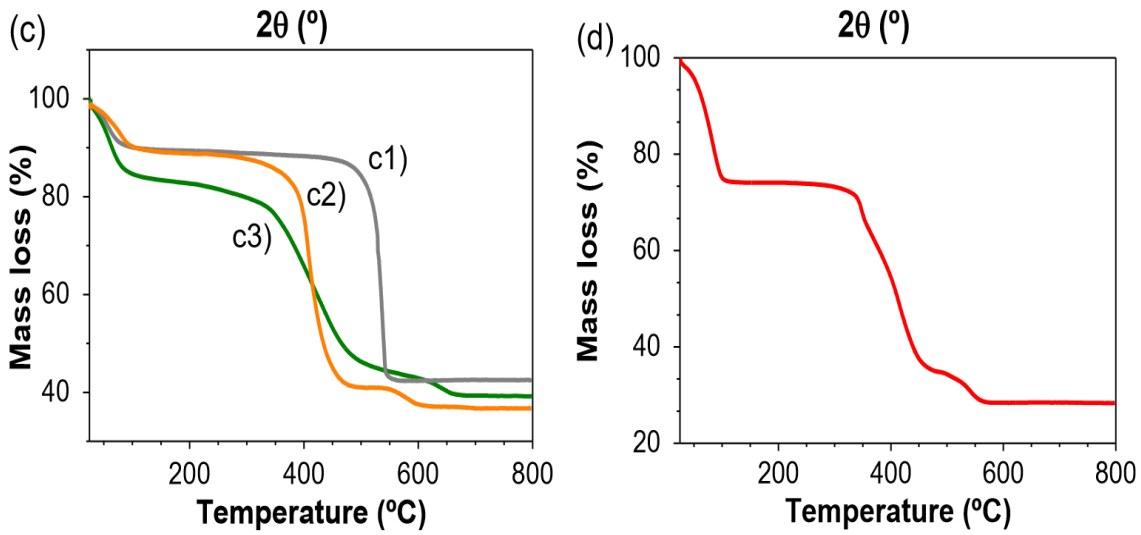



**Figura 2.** (c) TGA de UiO-66(Zr) (c1), UiO-66(Zr)-$NO_2$ (c2), UiO-66(Zr)-$NH_2$ (c3) y MIL-125(Ti)-$NH_2$ (d).

Un aspecto importante en fotocatálisis es la determinación de los niveles energéticos de los materiales a estudiar (Figura **2**). Esto comprende determinar la banda prohibida, el orbital de cristal ocupado de mayor energía y el orbital de cristal desocupado de menor energía. La Figura 3 muestra que todos los materiales cumplen los requisitos termodinámicos para ser empleados en el proceso de fotorreformado de glicerol en agua.

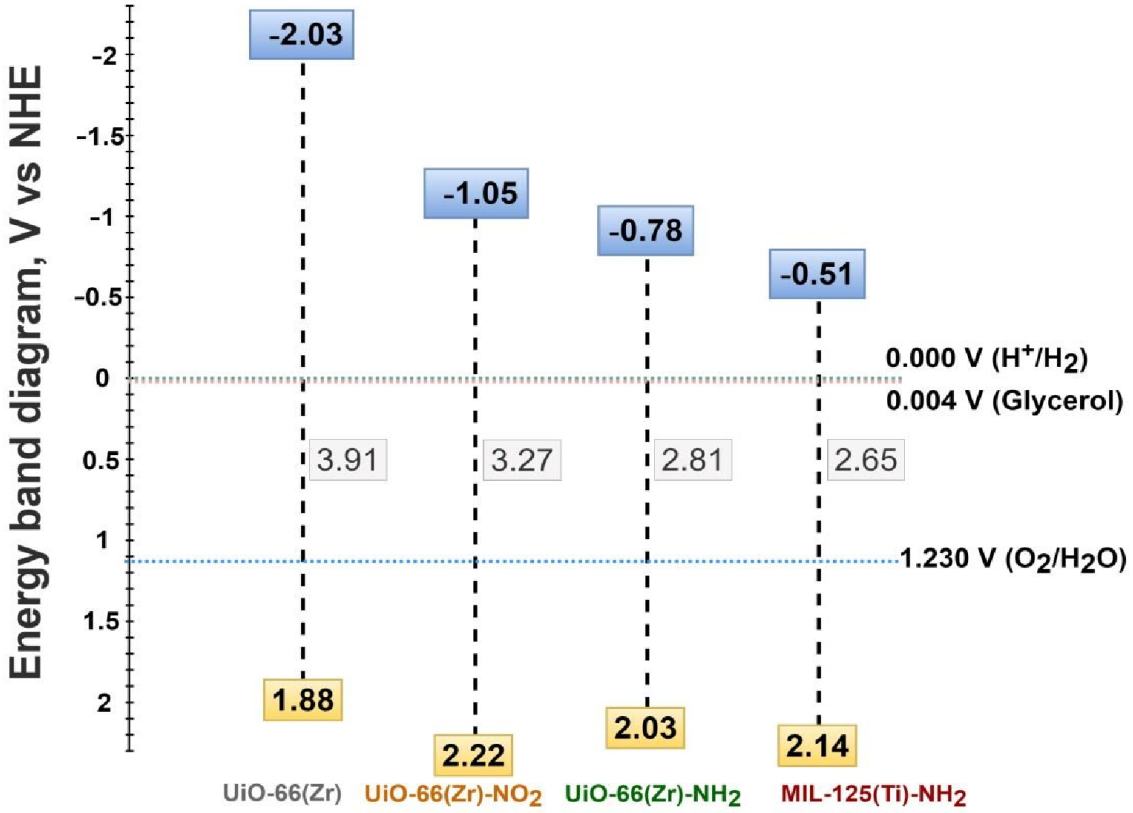



**Figura 2.** Diagrama de bandas de energía de UiO-66(Zr)-H, UiO-66(Zr)-$NO_2$, UiO-66(Zr)-$NH_2$ y MIL125(Ti)-$NH_2$ con los potenciales de reducción del protón y del oxígeno, además del potencial de oxidación del glicerol.

### Resultados fotocatalíticos

La actividad de la serie de los tres materiales tipo UiO-66(Zr) y MIL-125(Ti)-NH2 fue estudiada para la producción de H2 a partir del fotorreformado de glicerol en disolución acuosa bajo irradiación solar simulada (Figura 4). En esta reacción, el glicerol se oxida tras varios pasos, dando lugar a la formación de CO2 e H2, al actuar como agente de sacrificio dador de electrones al interaccionar con los huecos fotogenerados en el MOF. Por su lado, los electrones fotogenerados reducen los protones en H2 [11]. Los resultados muestran que el UiO-66(Zr)-NH2 es el fotocatalizador más activo dando como resultado una ratio molar de H2:CO2 de 7.3 después de 3 h de reacción. En ningún caso se obtuvo una conversión superior al 0,5% y, durante la reacción, se observaron trazas de metano en el reactor, además la cristalinidad y morfología se mantuvo como se demuestra por las mediciones de PXRD y SEM. La razón de la mayor actividad del UiO(Zr)-NH2 con respecto a sus análogos se debe a la mayor capacidad de este de absorber en el espectro de la luz visible. En lo relativo al MIL-125(Ti)-NH2 donde ambos comparten el grupo funcionalizado de tipo amino, la mayor actividad es resultado de un LUCO más negativo del UiO-66(Zr)-NH2 con respecto al MIL-125(Ti)-NH2 lo que favorece la reacción de oxidación de glicerol.

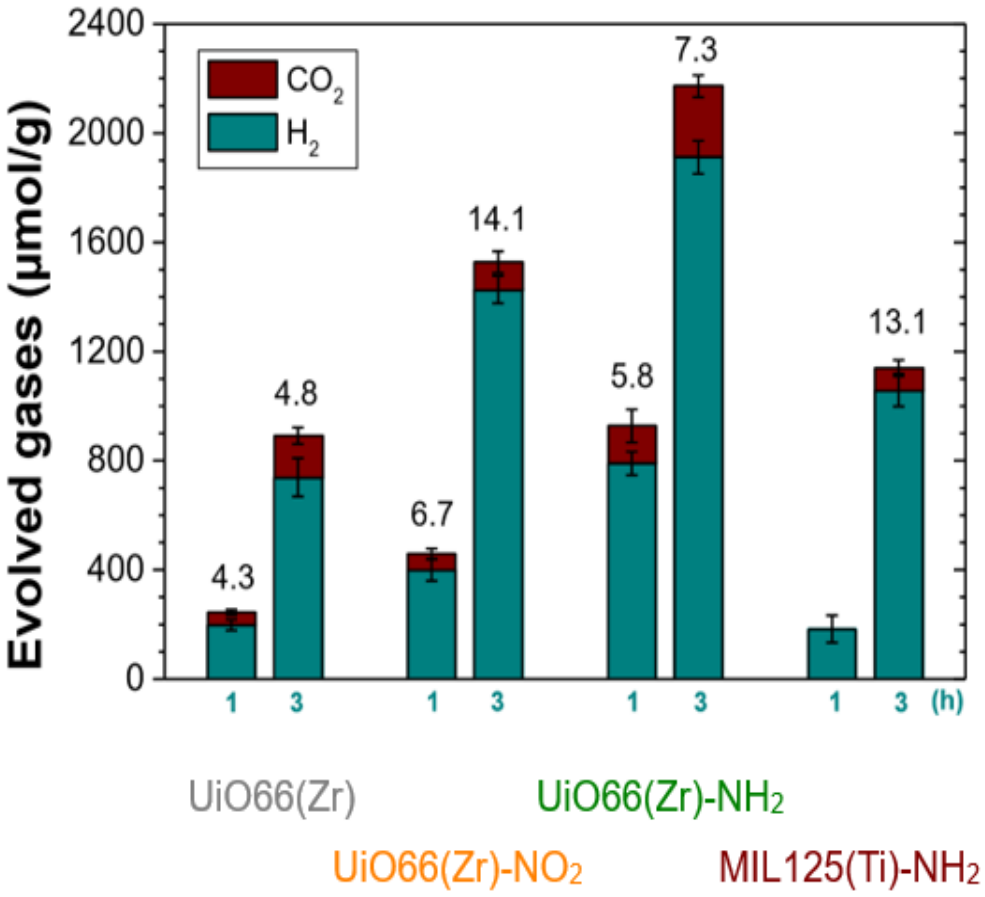



**Figura 4**. Valores referentes a la generación de $H_2$ y $CO_2$ a partir de la fotocatálisis de una solución acuosa de glicerol empleando los MOF estudiados. Condiciones de reacción: 5 mg de fotocatalizador en 20 ml al 14%v/v de mezcla de $H_2O$ y glicerol, con irradiación simulada de 230 W/cm$^2$ a 35 ºC.

## CONCLUSIONES

En conclusión, el estudio realizado revela que los materiales basados en UiO-66(Zr)-X (X: NH2, NO2, H) son adecuados para la generación solar de $H_2$ a partir de disoluciones acuosas de glicerol. El UiO-66(Zr)-$NH_2$ se presenta como el material más fotoactivo para la reacción de interés, seguido del UiO-66(Zr)-$NO_2$ y resultando el UiO-66(Zr) aquel menos activo. Este orden se asocia al diagrama de energía adecuado del UiO-66(Zr)-$NH_2$ para promover la reacción de modo eficiente bajo luz solar simulada.

## AGRADECIMIENTOS

S.N. agradece la ayuda del proyecto PID2024-155324OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "ERDF A way of making Europe" http://dx.doi.org/10.13039/501100011033. B.F y S.N. agradecen la financiación recibida de la Agencia Valenciana de la Innovación a través de la ayuda INNEST/2025/257 (GVA-AVI, BIO3CAT).

A. T. agradece la ayuda del proyecto Redhy, REDOX-MEDIATED ECONOMIC, CRITICAL RAW MATERIAL FREE, LOW CAPEX AND HIGHLY EFFICIENT GREEN HYDROGEN PRODUCTION TECHNOLOGY, 101137893 , HORIZON-JTI-CLEANH2-2023-01-01.

## REFERENCIAS

[1] Rueda-Navarro, C. M., Ferrer, B., Baldoví, H. G., & Navalón, S. (2022). Photocatalytic Hydrogen Production from Glycerol Aqueous Solutions as Sustainable Feedstocks Using Zr-Based UiO-66 Materials under Simulated Sunlight Irradiation. Nanomaterials, 12(21). https://doi.org/10.3390/nano12213808

[2] Bos, K., & Gupta, J. (2019, October 1). Stranded assets and stranded resources: Implications for climate change mitigation and global sustainable development. Energy Research and Social Science, Vol. 56. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.05.025

[3] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., … Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. Earth System Science Data, 12(4), 3269–3340. https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020

[4] Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2020, May 1). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. International Journal of Energy Research, Vol. 44, pp. 4110–4131. John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/er.4930

[5] Férey, C., Mellot-Draznieks, C., Serre, C., Millange, F., Dutour, J., Surblé, S., & Margiolaki, I. (2005). Chemistry: A chromium terephthalate-based solid with unusually large pore volumes and surface area. Science, 309(5743), 2040–2042. https://doi.org/10.1126/science.1116275

[6] Furukawa, H., Cordova, K. E., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks. Science, 341(6149), 1230444. https://doi.org/10.1126/science.1230444

[7] Kitagawa, S., Kitaura, R., & Noro, S. I. (2004, April 26). Functional porous coordination polymers. Angewandte Chemie - International Edition, Vol. 43, pp. 2334–2375. https://doi.org/10.1002/anie.200300610

[8] Rumayor, M., Corredor, J., Rivero, M. J., & Ortiz, I. (2022). Prospective life cycle assessment of hydrogen production by waste photoreforming. Journal of Cleaner Production, 336, 130430. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130430

[9] Melillo, A., García-Vallés, C., Ferrer, B., Álvaro, M., Navalón, S., & García, H. (2021). Bifunctional metal-organic frameworks for the hydrogenation of nitrophenol using methanol as the hydrogen source. *Organic and Biomolecular Chemistry*, *19*(4), 794–800. https://doi.org/10.1039/d0ob01686a

[10] Shearer, G. C., Chavan, S., Bordiga, S., Svelle, S., Olsbye, U., & Lillerud, K. P. (2016). Defect Engineering: Tuning the Porosity and Composition of the Metal-Organic Framework UiO-66 via Modulated Synthesis. *Chemistry of Materials*, *28*(11), 3749–3761. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00602

[11] Puga, A. V. (2016). Photocatalytic production of hydrogen from biomass-derived feedstocks. *Coordination Chemistry Reviews*, *315*, 1–66. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.12.009

# Evaluación Mecánica de un Material Compuesto Funcional Basado en Componentes Activos de Cannabis Sativa

**Boronat-Castellar, Irene[(1)], Reig-Valor, Miguel-Jorge[(2)], López-Pérez, Maria-Fernanda[(2)], Domínguez-Candela, Ivan[(1)], Fombuena, Vicent[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España. Email: iborcas@epsa.upv.es*

*(2) Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España*

## RESUMEN

El presente estudio se centra en el desarrollo y caracterización mecánica de una resina epoxi elaborada a partir de aceite de cáñamo epoxidado (ACE), reforzada con cáscara de la propia semilla como carga lignocelulósica natural. Las formulaciones mantuvieron constante la proporción de ACE y la combinación de endurecedores: aceite de cáñamo maleinizado (ACM), de origen biológico, y anhídrido metilnadico (MNA) de origen petroquímico. Con el fin de evaluar la influencia del refuerzo sobre el comportamiento mecánico, se incorporaron distintos porcentajes de cáscara de semilla de cáñamo (0%, 5%, 10%, 15% y 20% en peso).

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de flexión, impacto Charpy y dureza Shore D. Los resultados mostraron que el contenido de carga influye de forma significativa en las propiedades de la resina. La formulación con un 10% de FHO presentó el comportamiento más equilibrado, manteniendo propiedades similares a la muestra sin carga y aumentando el contenido bio del sistema. Por el contrario, contenidos superiores de refuerzo redujeron las propiedades mecánicas debido a problemas de cohesión entre la matriz epoxi y las partículas lignocelulósicas. Estos resultados evidencian la viabilidad del empleo de componentes derivados de *Cannabis sativa* para desarrollar resinas sostenibles con elevado contenido biobasado.

**Palabras clave:** termoestables, resina epoxi, aceite de cáñamo epoxidado, aceite de cáñamo maleinizado, caracterización mecánica

## INTRODUCCIÓN

La búsqueda de materiales con menor impacto ambiental ha impulsado el interés por sustituir los polímeros sintéticos convencionales por alternativas de origen renovable. En este contexto, los aceites vegetales han adquirido un papel relevante debido a su carácter sostenible y a las posibilidades químicas que ofrecen para obtener nuevos materiales poliméricos [1]. A través de modificaciones químicas como la epoxidación o la maleinización, estos aceites pueden convertirse en precursores adecuados para fabricar polímeros termoestables con propiedades ajustables.

Entre los distintos aceites estudiados, el de cáñamo destaca por su elevada cantidad de dobles enlaces y por ser una materia prima accesible. Estas características facilitan su conversión en compuestos con alta reactividad química, lo que permite emplearlo en la síntesis de resinas epoxi de origen biobasado [2].

Por otro lado, la incorporación de refuerzos naturales como la cáscara de cáñamo (FHO) permite desarrollar materiales más sostenibles al mismo tiempo que se da utilidad a residuos agrícolas con escaso valor comercial. El empleo de este tipo de cargas en matrices poliméricas no solo contribuye a reducir la dependencia de materiales sintéticos, sino que también puede influir de manera significativa en el comportamiento mecánico del compuesto final [3].

Asimismo, el estudio de las propiedades mecánicas de estos materiales resulta fundamental para determinar su comportamiento estructural y evaluar su posible aplicación en distintos sectores industriales. Este tipo de investigaciones favorece el desarrollo de compuestos poliméricos parcialmente biobasados, más sostenibles y alineados con las actuales estrategias de economía circular y desarrollo sostenible.

## OBJETIVOS

Este trabajo tiene como finalidad analizar el comportamiento mecánico de diversas resinas epoxi basadas en aceite de cáñamo previamente modificado mediante un proceso de epoxidación. Dichas resinas se combinan con aceite de cáñamo maleinizado, empleado como endurecedor de origen biológico, y con anhídrido metilnádico (MNA) como endurecedor de origen petroquímico, manteniendo fija la proporción entre ambos. Además, se incorporan diferentes contenidos de cáscara de semilla de cáñamo (FHO) como carga natural (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %) con el propósito de obtener materiales con un alto porcentaje de componentes biobasados.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El aceite de semilla de cáñamo (Cannabis sativa) se obtuvo mediante prensado en frío utilizando una extrusora CZR-309, proporcionada por Changyouxin Trading Co. (Zhucheng, China). Las semillas de cáñamo empleadas para la extracción se adquirieron en un mercado local de Canals (València, España). Tras la obtención del aceite, este fue sometido a un proceso de epoxidación llevado a cabo a 75 °C durante 8 horas.

Las formulaciones preparadas estuvieron compuestas principalmente por aceite de cáñamo epoxidado (ACE), representando el 50,6 % de la masa total. Para el proceso de curado se utilizaron dos endurecedores en proporciones constantes: anhídrido metilnádico (MNA), de origen petroquímico, con un contenido del 35 % en masa y un peso equivalente de anhidro (AEW) de 178 g/eq, y aceite de cáñamo maleinizado (ACM), de origen biológico, incorporado en un 11,6 % en masa de acuerdo con descripciones en anteriores artículos [4], con un índice de acidez de 106 mg KOH/g y un AEW de 178 g/eq.

Además, se empleó 1-metilimidazol como acelerador de la reacción en una proporción del 2 % en peso y glicerol como catalizador al 0,8 % en peso. Ambos productos fueron suministrados por Sigma Aldrich (Madrid, España).

Con el objetivo de estudiar el efecto del refuerzo lignocelulósico, todas las mezclas se formularon manteniendo constante la composición de ACE, MNA, ACM, acelerador y catalizador, variando únicamente el porcentaje de FHO molida añadida como carga natural, según se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Contenido de cáscara de cáñamo en los compuestos desarrollados.

| Muestra | FHO (%) |
|---|---|
| 0-FHO | 0 |
| 5-FHO | 5 |
| 10-FHO | 10 |
| 15-FHO | 15 |
| 20-FHO | 20 |

La caracterización mecánica de las distintas formulaciones desarrolladas se llevó a cabo mediante ensayos de flexión, impacto Charpy y dureza, con el objetivo de evaluar la influencia del contenido de cáscara de cáñamo sobre el comportamiento mecánico de los materiales obtenidos.

Los ensayos de flexión se realizaron en una máquina universal de ensayos ELIB 30 de S.A.E. Ibertest (Madrid, España), siguiendo las especificaciones establecidas en la norma ISO 178. Para ello, se empleó una célula de carga de 5 kN y una velocidad de desplazamiento del cabezal de 5 $mm \cdot min^{-1}$.

La resistencia al impacto se determinó mediante ensayos Charpy utilizando un péndulo de 1 J suministrado por Metrotec S.A. (San Sebastián, España), de acuerdo con la norma ISO 179. Tanto para los ensayos de flexión como para los de impacto se utilizaron probetas con dimensiones aproximadas de 80 × 10 × 4 $mm^3$.

Por otro lado, la dureza de los materiales se evaluó mediante un durómetro Shore D modelo 673-D de J. Bolt Instruments (Barcelona, España), siguiendo las indicaciones de la norma ISO 868.

Todos los ensayos mecánicos se realizaron a temperatura ambiente y se analizaron al menos cinco probetas de cada formulación, calculándose posteriormente los valores promedio obtenidos para cada propiedad estudiada.

## RESULTADOS

En la

Tabla ***2*** se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de flexión realizados sobre las diferentes formulaciones desarrolladas con distintos contenidos de FHO como carga lignocelulósica. Los parámetros evaluados fueron la resistencia máxima a flexión y el módulo de flexión, con el objetivo de determinar la influencia del contenido de refuerzo natural sobre la rigidez y capacidad mecánica de los materiales compuestos.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos a partir del análisis de flexión

| Muestra | Resistencia flexión (MPa) | Módulo flexión (MPa) |
|---|---|---|
| 0-FHO | 13,42 ± 1,72 | 165,30 ± 21,00 |
| 5-FHO | 7,49 ± 0,18 | 50,51 ± 24,91 |
| 10-FHO | 12,54 ± 1,69 | 122,99 ± 18,77 |
| 15-FHO | 5,02 ± 0,29 | 29,40 ± 6,99 |
| 20-FHO | 4,38 ± 0,71 | 14,38 ± 3,07 |

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de FHO afecta significativamente al comportamiento mecánico de las formulaciones desarrolladas. La muestra sin carga natural (0-FHO) presentó los valores más elevados tanto de resistencia a flexión como de módulo de flexión. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor homogeneidad de la matriz polimérica y a la ausencia de discontinuidades internas generadas por las partículas lignocelulósicas.

La incorporación inicial de un 5 % de cáscara de cáñamo (FHO) produjo una disminución considerable de las propiedades mecánicas, reduciendo la resistencia a flexión. Este descenso podría estar relacionado con una deficiente adhesión interfacial entre la matriz epoxi biobasada y las partículas de refuerzo, lo que favorece la aparición de concentradores de tensión y defectos internos capaces de iniciar mecanismos prematuros de fractura.

Sin embargo, al incrementar el contenido de carga hasta el 10 %, se observó una recuperación parcial de las propiedades mecánicas. Este comportamiento podría indicar una mejor distribución de las partículas dentro de la matriz o una mayor interacción física entre los componentes.

Por otra parte, las formulaciones con contenidos superiores de FHO, correspondientes al 15 % y 20 %, presentaron nuevamente una reducción significativa de las propiedades mecánicas. La elevada cantidad de carga natural podría dificultar la correcta movilidad de las cadenas poliméricas durante el proceso de curado, generando estructuras menos compactas y más frágiles.

Por otro lado, en la Figura 1 se recogen los resultados obtenidos en el ensayo de impacto Charpy para evaluar la resiliencia de las diferentes formulaciones analizadas.

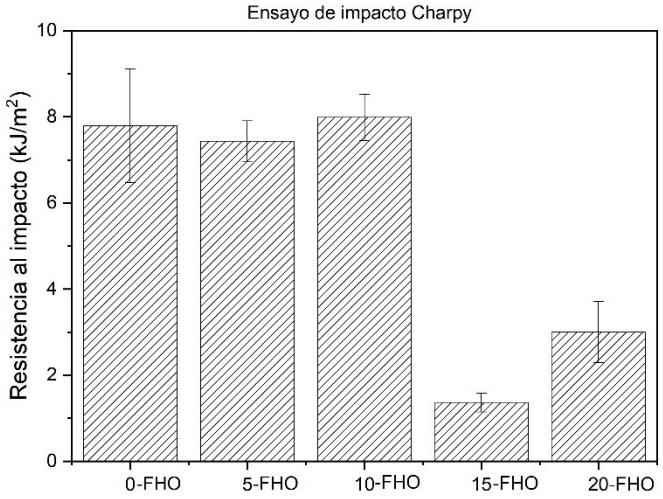



**Figura 1.** Resultados obtenidos de resiliencia tras el ensayo de impacto Charpy

La incorporación de FHO produjo variaciones en la capacidad de absorción de energía de las formulaciones estudiadas. La presencia de partículas lignocelulósicas puede actuar simultáneamente como mecanismo de disipación de energía y como punto de iniciación de grietas, dependiendo de la compatibilidad entre matriz y refuerzo.

En las formulaciones con bajos contenidos de carga (desde un 0 hasta un 10 %), la distribución relativamente homogénea de las partículas podría favorecer mecanismos de desviación de grietas y absorción energética, contribuyendo a mantener valores de resiliencia aceptables. Sin embargo, a medida que aumenta el contenido de FHO a un

15 % y un 20 %, la presencia de aglomerados y defectos interfaciales puede facilitar la propagación de fracturas frágiles, reduciendo la energía absorbida durante el impacto.

Además, el carácter rígido y lignocelulósico de la cáscara de cáñamo puede limitar parcialmente la deformación plástica de la matriz epoxi, favoreciendo mecanismos de fractura más rápidos.

Finalmente, la Figura 2 muestra los resultados correspondientes al ensayo de dureza Shore D realizado sobre las diferentes formulaciones desarrolladas para evaluar la resistencia del material frente a la penetración.

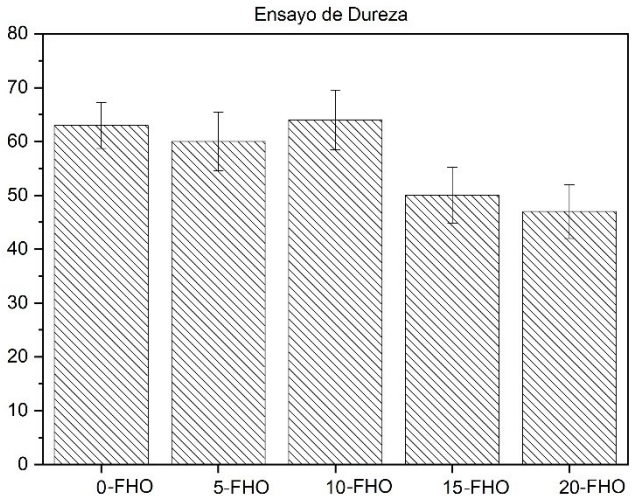



**Figura 2.** Resultados obtenidos tras el ensayo de Dureza Shore

Como se observa, al incorporar FHO se modificó el comportamiento superficial de los materiales en función del porcentaje de carga incorporado. La formulación con un 10 % de carga mostró un incremento de la dureza Shore D, indicando una mayor rigidez superficial del material debido a la presencia del refuerzo lignocelulósico y a una interacción más eficiente entre matriz y carga.

Por otro lado, las formulaciones con contenidos del 15 % y 20 % de FHO experimentaron una reducción significativa de la dureza. Este comportamiento puede atribuirse a un exceso de carga lignocelulósica, que dificulta la correcta cohesión de la matriz polimérica sobre las partículas de refuerzo y, en consecuencia, que se generen defectos estructurales y vacíos internos que reducen la uniformidad superficial del material.

## CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la influencia de la incorporación de cáscara de cáñamo (FHO) sobre el comportamiento mecánico de materiales compuestos desarrollados a partir de aceite de cáñamo epoxidado. Los resultados obtenidos muestran que el contenido de carga lignocelulósica tiene una influencia directa sobre las propiedades mecánicas de los materiales desarrollados.

La formulación con un 10 % de FHO presentó el comportamiento más equilibrado, manteniendo propiedades mecánicas similares a las de la matriz sin carga y permitiendo aumentar simultáneamente el contenido biobasado del material. En los ensayos de flexión, esta formulación mostró valores próximos a la muestra sin carga tanto en

resistencia como en módulo de flexión, indicando una adecuada interacción entre matriz y refuerzo para contenidos moderados de carga.

Por el contrario, las formulaciones con contenidos del 15 % y 20 % de cáscara de cáñamo mostraron una disminución significativa de las propiedades mecánicas evaluadas. Este comportamiento se atribuye al exceso de carga lignocelulósica incorporada, que dificulta la correcta cohesión de la matriz epoxi, favoreciendo la aparición de aglomeraciones y defectos internos, afectando negativamente a la transferencia de esfuerzos dentro del material.

Los resultados de dureza mostraron igualmente que contenidos moderados de carga pueden contribuir al mantenimiento de la rigidez superficial del material, mientras que porcentajes elevados de carga provocan una pérdida de uniformidad estructural y una disminución de las propiedades superficiales. De forma similar, el comportamiento frente al impacto evidenció la influencia de la compatibilidad matriz-refuerzo y de la dispersión de partículas sobre la capacidad de absorción de energía de las formulaciones desarrolladas.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del empleo de componentes derivados de *Cannabis sativa* para el desarrollo de materiales sostenibles con elevado contenido biobasado. Asimismo, se confirma la necesidad de optimizar el porcentaje de carga natural incorporada para alcanzar un equilibrio adecuado entre sostenibilidad y comportamiento mecánico.

## REFERENCIAS

[1] Dominguez-Candela, I.; Gomez-Caturla, J.; Cardona, S. C.; Lora-Garcia, J.; Fombuena, V. (2022). "Novel compatibilizers and plasticizers developed from epoxidized and maleinized chia oil in composites based on PLA and chia seed flour". *European Polymer Journal*, v. 173, p. 111289. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111289

[2] Lerma-Cantó, A.; Samper, M. D.; Domínguez-Candela, I.; Garcia-Garcia, D.; Fombuena, V. (2023). "Epoxidized and Maleinized Hemp Oil to Develop Fully Bio-Based Epoxy Resin Based on Anhydride Hardeners". *Polymers*, v. 15(6), p. 1404. https://doi.org/10.3390/polym15061404

[3] Miao, S.; Wang, P.; Su, Z.; Zhang, S. (2014). "Vegetable-oil-based polymers as future pol ymeric biomaterials". *Acta Biomaterialia*, v. 10(4), p.p. 1692–1704. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.08.040

[4] España, J. M.; Sánchez-Nacher, L.; Boronat, T.; Fombuena, V.; Balart, R. (2012). "Properties of biobased epoxy resins from epoxidized soybean oil (ESBO) cured with maleic anhydride (MA)". *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 89(11), p.p 2067-2075. https://doi.org/10.1007/s11746-012-2102-2

# Cálculo simultáneo de raíces múltiples mediante esquemas iterativos sin derivadas y tipo Ehrlich

**Chicharro, Francisco I.[(1)], Garrido, Neus[(1)], Jerezano, Julissa H.[(2,3)]**

*(1) I.U. Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, España – frachilo@mat.upv.es, neugarsa@mat.upv.es*

*(2) Programa de Doctorado en Matemáticas, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, España – jhjerull@doctor.upv.es*

*(3) Departamento de Matemática, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, 21102 San Pedro Sula, Honduras.*

## RESUMEN

En este trabajo se propone el diseño de dos métodos iterativos de dos pasos para el cálculo simultáneo de raíces múltiples de ecuaciones no lineales, mediante la técnica de composición predictor-corrector. En el primer paso se emplea un esquema predictor libre de derivadas, con el fin de generar aproximaciones iniciales eficientes sin requerir información sobre derivadas. En el segundo paso se aplica un corrector de tipo Ehrlich, también libre de derivadas, que mejora la precisión de las aproximaciones y favorece la convergencia del método.

Los métodos desarrollados permiten abordar de manera simultánea la determinación de raíces con multiplicidad, reduciendo el costo computacional asociado al cálculo de derivadas y mejorando la estabilidad numérica. Asimismo, se analiza su comportamiento mediante experimentos numéricos aplicados a funciones polinómicas y no polinómicas.

Los resultados obtenidos evidencian la eficacia y robustez de los métodos propuestos, mostrando un buen desempeño en términos de convergencia y precisión.

**Palabras clave:** raíces múltiples, ecuaciones no lineales, método iterativo, cálculo simultáneo de raíces, métodos sin derivadas.

## INTRODUCCIÓN

Muchos problemas en campos como la ciencia, la ingeniería, la economía y otras disciplinas requieren la resolución de ecuaciones no lineales de la forma $f(x) = 0$, donde $f: I \subseteq \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ [1,2]. A diferencia de las ecuaciones lineales, este tipo de ecuaciones generalmente no admiten soluciones analíticas exactas en forma cerrada, por lo que se requieren métodos iterativos para aproximarlas.

Estos métodos consisten en procedimientos numéricos que, a partir de una estimación inicial $x^{[0]}$, generan aproximaciones sucesivas a las raíces de la ecuación. Sin embargo, cuando una raíz tiene multiplicidad mayor que uno, lo que significa que la función $f(x)$ y varias de sus derivadas se anulan en ese punto, los métodos iterativos estándar pueden perder eficiencia, presentando una convergencia lenta o incluso fallando en algunos casos.

En particular, el método de Newton presenta convergencia cuadrática cuando la raíz es simple; sin embargo, para raíces con multiplicidad mayor que uno ($m > 1$), la convergencia se reduce a lineal. Esta reducción en el orden de convergencia se debe a que la ecuación de error en cada iteración está influenciada por la multiplicidad de la raíz, lo que disminuye la eficiencia general del método. Por lo tanto, es necesario utilizar métodos iterativos diseñados específicamente para encontrar raíces múltiples. En este contexto, Schröder [3] propuso en 1870 una modificación del método de Newton, en la que se conserva la convergencia cuadrática mediante la expresión iterativa

$$x^{[k+1]} = x^{[k]} - m\frac{f\left(x^{[k]}\right)}{f'(x^{[k]})}, \qquad k = 0,1,\ldots \tag{1}$$

Además de (1), en la literatura existen numerosos métodos con distintos órdenes de convergencia para determinar las raíces múltiples de $f(x) = 0$. La mayoría de estos métodos requieren la evaluación de derivadas de primer orden o incluso de primer y segundo orden. En este contexto, uno de los objetivos de este trabajo es diseñar métodos libres de derivadas. Estos métodos resultan especialmente útiles cuando la derivada de la función $f$ es difícil de calcular o costosa de evaluar.

Una de las técnicas sin derivadas es el esquema de tipo Traub–Steffensen [4], que reemplaza $f'\left(x^{[k]}\right)$ en el método de Newton por una aproximación de la forma

$$f'\left(x^{[k]}\right) \simeq f\left[w^{[k]}, x^{[k]}\right],$$

donde $f[w, \mathrm{x}] = \frac{f(w)-f(x)}{w-x}$ es la diferencia dividida de primer orden con $w = x + \beta f(x), \beta \in \mathbb{R} - \{0\}$.

De este modo, el método de Newton modificado (1) se transforma en el método de Traub–Steffensen modificado:

$$x^{[k+1]} = x^{[k]} - m\frac{f\left(x^{[k]}\right)}{f\left[w^{[k]}, x^{[k]}\right]}, \qquad k = 0,1,\ldots \tag{2}$$

El método de Traub–Steffensen modificado (2) tiene ventaja respecto al método de Newton modificado (1), en el sentido que conserva el orden de convergencia cuadrático sin utilizar derivadas.

En la literatura se han propuesto numerosos métodos con diferentes órdenes de convergencia para hallar raíces múltiples de la ecuación $f(x) = 0$. Sin embargo, sólo unos pocos están diseñados para la determinación simultánea de raíces de ecuaciones no lineales, especialmente cuando algunas de estas raíces son múltiples. Estudios relacionados se pueden encontrar en [5, 6, 7].

Ehrlich [8] propuso un método iterativo con orden de convergencia cúbico para la aproximación simultánea de las $n$ raíces de un polinomio $p(x)$. Según este método, cada raíz $\alpha_i,\ i = 1, 2, \ldots, n,$ se aproxima mediante la expresión iterativa

$$x_i^{[k+1]} = x_i^{[k]} - \frac{p\left(x_i^{[k]}\right)}{p'\left(x_i^{[k]}\right) - p\left(x_i^{[k]}\right)\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1}{x_i^{[k]} - x_j^{[k]}}}, \qquad k = 0,1,\ldots \tag{3}$$

Cordero et al. diseñaron en [9] y [10] esquemas de búsqueda simultánea de raíces de orden $2\rho$, a partir de un método iterativo de punto fijo de orden $\rho$ y mediante el uso de técnicas de tipo Ehrlich, orientados a la aproximación de raíces simples de ecuaciones no lineales. Asimismo, en [10] se propuso un esquema de cuarto orden para la aproximación de raíces múltiples.

Siguiendo las ideas presentadas en [9, 10], en este trabajo se desarrollan nuevos procedimientos iterativos para la resolución simultánea de ecuaciones no lineales con raíces múltiples. Tras establecer el orden teórico de convergencia de los métodos propuestos, se lleva a cabo un estudio numérico con el fin de evaluar su desempeño en la aproximación simultánea de raíces múltiples.

## MÉTODOS ITERATIVOS PROPUESTOS

Consideramos la ecuación no lineal $f(x) = 0$, que tiene $n$ raíces múltiples denotadas por $\alpha_i$, para $, i = 1,2,\dots,n$, donde cada $\alpha_i$ tiene multiplicidad $m_i \in \mathbb{N}$. Los métodos iterativos que se proponen en este trabajo parten del esquema iterativo Traub–Steffensen modificado (2) como primer paso. Utilizando la composición de métodos, y utilizando una técnica tipo Ehrlich (3) en el segundo paso, proponemos el siguiente esquema de métodos iterativos:

$$\begin{cases} y_i^{[k]} = x_i^{[k]} - m_i \dfrac{f\left(x_i^{[k]}\right)}{f\left[w_i^{[k]},\ x_i^{[k]}\right]}, \\ x_i^{[k+1]} = y_i^{[k]} - m_i \dfrac{f\left(y_i^{[k]}\right)}{f\left[z_i^{[k]},\ y_i^{[k]}\right] - m_i\, f\left(y_i^{[k]}\right) \sigma_i^{[k]}}, \end{cases} \qquad k = 0,1,\dots \qquad (4)$$

para $i = 1,\dots,n$, donde $w = x + \beta f^2(x),\ \beta \in \mathbb{R} - \{0\},\ z = y + \gamma\, f^2(y),\ \gamma \in \mathbb{R} - \{0\}$, $f[w,\ x] = \frac{f(w)-f(x)}{\beta f^2(x)}, f[z,\ y] = \frac{f(z)-f(y)}{\gamma\, f^2(y)}$.

En el método TSEY reemplazamos $\sigma_i^{[k]}$por

$$\sigma_i^{[k]} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1}{y_i^{[k]} - y_j^{[k]}},$$

mientras que el método TSEX lo reemplazamos por

$$\sigma_i^{[k]} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \frac{1}{y_i^{[k]} - x_j^{[k]}}.$$

El esquema iterativo resultante implica un método predictor-corrector. Se puede demostrar que el esquema iterativo (4) tiene un orden de convergencia igual a cuatro.

## RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se analiza numéricamente la convergencia de los métodos libres de derivadas propuestos, TSEY y TSEX, para aproximar las soluciones de las ecuaciones no lineales:

- $f_1(x) = (x-1)(x-2)(x-4)$
- $f_2(x) = (x-2)^2(x+1)$
- $f_3(x) = (x+1)^3\,(e^x-1)^2$

Los experimentos numéricos se han llevado a cabo utilizando el software Matlab R2023a, seleccionando los valores de los parámetros $\beta = 0.01$ y $\gamma = 0.01$ Los cálculos se realizaron empleando aritmética de precisión variable con una mantisa de 200 dígitos, con el objetivo de garantizar que el criterio de parada $\left\|f\left(x^{[k]}\right)\right\|_2 < 10^{-50}$ se satisfaga sin problemas numéricos, como divisiones por cero. Además, se utilizó un máximo de 50 iteraciones como condición adicional de detención del algoritmo.

Los resultados se presentan en las Tablas 1, 2 y 3. Estas tablas incluyen la aproximación inicial $x^{[0]}$, las aproximaciones de las soluciones $\alpha_i$, el número de iteraciones $k$ requeridas para alcanzar la convergencia, la diferencia entre iteraciones en la última iteración $\mathcal{D} := \log_{10}\left(\left\|x^{[k+1]} - x^{[k]}\right\|_2\right)$, el residuo en la última iteración $\mathcal{R} := \log_{10}\left(\left\|f\left(x^{[k]}\right)\right\|_2\right)$, y el orden de convergencia computacional aproximado (ACOC) [11].

La Tabla 1 muestra el desempeño de los métodos propuestos cuando se aplican a un polinomio con tres raíces simples. En este contexto, se excluyen deliberadamente los problemas asociados a diferentes multiplicidades de raíces, ya que todas las raíces son simples.
El propósito de este experimento es aislar y analizar el efecto de la aproximación simultánea de las raíces, centrándose exclusivamente en la interacción inherente a los esquemas paralelos de búsqueda de raíces.

**Tabla 1.** Resultados numéricos para la ecuación $f_1(x) = 0$.

| Método | $x^{[0]}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $k$ | $\mathcal{D}$ | $\mathcal{R}$ | ACOC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TSEY | $\begin{pmatrix}0.5\\1.5\\3.5\end{pmatrix}$ | *1* | *4* | *2* | *5* | *-17.932* | *-109.05* | *6.1502* |
| TSEX | $\begin{pmatrix}0.5\\1.5\\3.5\end{pmatrix}$ | *1* | *4* | *2* | *6* | *-27.56* | *-87.479* | *5.246* |

El orden teórico de los métodos propuestos para aproximar raíces múltiples es de cuatro; sin embargo, en este caso se observan valores del ACOC superiores. En particular, el método TSEY presenta un mejor desempeño en términos del residuo.

La Tabla 2 muestra los resultados de aplicar métodos iterativos a un polinomio con una raíz simple y otra doble. Los esquemas se utilizan para aproximar simultáneamente ambas raíces, lo que permite evaluar sus prestaciones en presencia de multiplicidades distintas y en un contexto de cálculo paralelo de raíces.

**Tabla 2.** Resultados numéricos para la ecuación $f_2(x) = 0$.

| Método | $x^{[0]}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k$ | $\mathcal{D}$ | $\mathcal{R}$ | ACOC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TSEY | $\begin{pmatrix} 2.5 \\ -1.5 \end{pmatrix}$ | *2* | *-1* | *3* | *-14.847* | *-59.264* | *3.5072* |
| TSEX | $\begin{pmatrix} 2.5 \\ -1.5 \end{pmatrix}$ | *2* | *-1* | *3* | *-14.63* | *-58.394* | *3.4473* |

Los procedimientos iterativos propuestos aproximan simultáneamente raíces de distintas multiplicidades con alta precisión y en pocas iteraciones, lo que demuestra su efectividad y convergencia. Aunque el criterio de parada se satisface rápidamente, impidiendo la estabilización del ACOC, los valores obtenidos permanecen cercanos al orden teórico de convergencia cuatro.

La Tabla 3 presenta el desempeño de los métodos propuestos aplicados a funciones no lineales generales con raíces de multiplicidades distintas. Este experimento permite evaluar la robustez y la versatilidad de los esquemas propuestos más allá del caso polinómico, demostrando su capacidad para aproximar raíces múltiples simultáneamente en problemas no lineales arbitrarios.

**Tabla 3.** Resultados numéricos para la ecuación $f_3(x) = 0$.

| Método | $x^{[0]}$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $k$ | $\mathcal{D}$ | $\mathcal{R}$ | ACOC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TSEY | $\begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$ | *-1* | *5.9131e-73* | *4* | *-18.208* | *-54.828* | *4.1004* |
| TSEX | $\begin{pmatrix} -0.5 \\ 0.5 \end{pmatrix}$ | *-1* | *-1.0906e-58* | *4* | *-24.948* | *-61.211* | *5.2599* |

Los resultados de la Tabla 3 confirman que el método propuesto puede calcular con éxito las raíces de funciones no lineales arbitrarias con multiplicidades distintas. En particular, el método puede aproximar simultáneamente raíces de multiplicidades heterogéneas, extendiendo así su aplicabilidad más allá del marco clásico de los polinomios, tradicionalmente asociado con las técnicas de búsqueda simultánea de raíces.
Como se observó previamente para la función $f_2(x)$ en la Tabla 2, el criterio de parada se satisface después de un número muy reducido de iteraciones. Esta finalización temprana impide que el ACOC se estabilice.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el desempeño de métodos iterativos paralelos para la aproximación simultánea de raíces múltiples de ecuaciones no lineales sin conocer previamente sus multiplicidades. Los resultados muestran que los métodos son efectivos y robustos tanto para polinomios como para funciones no lineales generales con raíces de distintas multiplicidades. En conjunto, se confirma su buen rendimiento y su aplicabilidad en un marco más amplio que el del caso polinómico.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Convocatoria de Apoyo a la Investigación IMM 2026 – Instituto Universitario de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València.

## REFERENCIAS

[1] Argyros, C.; Argyros, M. I.; Argyros, I. K.; Magrenan, A. A.; Sarria, I. (2023). "Local and semilocal convergence for Chebyshev two point like methods with applications in different fields". *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 426, p.p. 115072. https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115072

[2] Bhavna; Bhatia, S. (2024). "Convergence analysis of optimal iterative family for multiple roots and its applications". *Journal of Mathematical Chemistry*, v. 62, n. 8, p.p. 2007–2038. https://doi.org/10.1007/s10910-024-01640-6

[3] Schröder, E. (1870). "Über unendlich viele algorithmen zur auflösung der gleichungen". *Mathematische Annalen*, v. 2, n. 2, p.p. 317–365. https://doi.org/10.1007/BF01444024

[4] Traub, J. F. (1982). "Iterative Methods for the Solution of Equations". *Chelsea Publishing Company*, New York. ISBN: 0 8284 0312 0

[5] Nedzhibov, G. H. (2013). "Iterative methods for simultaneous computing arbitrary number of multiple zeros of nonlinear equations". *International Journal of Computer Mathematics*, v. 90, n. 5, p.p. 994–1007. https://doi.org/10.1080/00207160.2012.744000

[6] Petković, M. S.; Petković, L. D.; Džunić, J. (2014). "On an efficient method for the simultaneous approximation of polynomial multiple roots". *Applicable Analysis and Discrete Mathematics*, p.p. 73–94. https://doi.org/10.2298/AADM140310005P

[7] Shams, M.; Carpentieri, B. (2026). "A high-order parallel framework for simultaneous root-finding in nonlinear systems with multiple solutions". *AppliedMath*, v. 6, n. 3, p.p. 43. https://doi.org/10.3390/appliedmath6030043

[8] Ehrlich, L. W. (1967). "A modified Newton method for polynomials". *Communications of the ACM*, v. 10, p.p. 107–108. https://doi.org/10.1145/363067.363115

[9] Cordero, A.; Garrido, N.; Torregrosa, J. R.; Triguero-Navarro, P. (2022). "Iterative schemes for finding all roots simultaneously of nonlinear equations". *Applied Mathematics Letters*, v. 134, p.p. 108325. https://doi.org/10.1016/j.aml.2022.108325

[10] Cordero, A.; Garrido, N.; Torregrosa, J. R.; Triguero-Navarro, P. (2023). "An iterative scheme to obtain multiple solutions simultaneously". *Applied Mathematics Letters*, v. 145, p.p. 108738. https://doi.org/10.1016/j.aml.2023.108738

[11] Cordero, A.; Torregrosa, J. (2007). "Variants of Newton's method using fifth–order quadrature formulas". *Applied Mathematics and Computation*, v. 190, p.p. 686–698. https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.01.062

# Gemelos digitales en el sector cerámico: análisis del stand virtual

**Jover Peris, Vicente[(1)] ; Jordán Núñez, Jorge[(1)]**
*(1) Departamento de Ingeniería Gráfica , Universitat Politècnica de València, Campus d'Alcoi, Plaça Ferrándiz-Carbonell S/N, Alcoi, 03801, Alicante, vijope@degi.upv.es; jorjornu@upv.es*

## RESUMEN

Se presenta el diseño de un sistema de configuración 3D basado en realidad virtual (VR) orientado al gemelo digital (DT) de productos cerámicos. La arquitectura propuesta integra un pipeline de activos con materiales físicamente basados (PBR), estándares de interoperabilidad (glTF 2.0) y un flujo de trabajo colorimétrico para la calibración visual de apariencias. Se realizó un estudio piloto comparando dos condiciones de interacción: Experiencia de Escritorio Vs Experiencia Inmersiva VR. Los resultados revelan una diferencia estadísticamente significativa en usabilidad (SUS: 88,39 ± 5,34 vs. 77,68 ± 2,68; p = 0,0014) favorable a la condición Escritorio, mientras que la condición Inmersiva presentó puntuaciones superiores en presencia espacial y realismo percibido (IPQ). Estos hallazgos evidencian un compromiso entre facilidad de uso e inmersión perceptual. Los resultados sugieren que el entorno presenta viabilidad perceptual y operativa para el sector cerámico; la validación con métricas comerciales reales queda como línea de trabajo futuro

**Palabras clave:** gemelo digital; realidad virtual; stand virtual; cerámica; configurador de producto; PBR; usabilidad; presencia.

## INTRODUCCIÓN

El sector cerámico comercializa productos cuyo valor percibido depende en gran medida de atributos visuales del acabado como color, textura, brillo, escala gráfica y continuidad de veta, y de su interacción con el entorno arquitectónico. A diferencia de otros bienes industriales, la decisión de compra no se basa únicamente en parámetros dimensionales o funcionales, sino también en la capacidad del cliente para anticipar cómo se comportará una superficie en una estancia real, con iluminación, mobiliario y combinaciones de materiales. En canales B2B, la selección de un acabado implica prescriptores, equipos comerciales, distribuidores, estudios de arquitectura y cliente final, por lo que los ciclos de decisión tienden a ser prolongados y dependen de la comparación fiable de alternativas [1]. En este contexto, un stand virtual puede actuar como showroom permanente, disponible sin las restricciones espaciales y temporales de una feria, y como herramienta de apoyo a la venta consultiva, al facilitar la visualización contextualizada de colecciones cerámicas.

El concepto de DT ha sido sistematizado por Kritzinger et al. [2], que distinguen entre Digital Model, Digital Shadow y Digital Twin según el grado de integración y flujo de datos entre el sistema físico y su representación digital. La solución presentada se sitúa de forma deliberada entre las dos primeras categorías: reproduce el stand, las escenas de aplicación y el catálogo en un entorno 3D funcional, pero la sincronización bidireccional con sistemas de negocio, inventario, fabricación o CRM no forma parte de la evidencia reportada en este piloto. Por tanto, el término DT se emplea aquí como horizonte arquitectónico y no como afirmación de una integración completa en tiempo

real. Esta delimitación es relevante porque permite evaluar primero la utilidad perceptual y operativa del entorno, antes de abordar capas posteriores de conexión con datos comerciales, trazabilidad de producto o analítica de uso.

La literatura sobre VR/AR indica que la combinación de presencia e interactividad influye en la percepción y evaluación de productos en entornos inmersivos [3]. Los configuradores 3D fortalecen actitudes hacia la marca frente a catálogos 2D estáticos [4,5], mientras que la telepresencia facilita la comprensión del usuario en tiendas virtuales [6]. Asimismo, la personalización masiva puede incrementar los beneficios percibidos cuando el usuario participa activamente en la configuración del producto [7]. Para materiales cerámicos con acabados brillantes o semibrillantes existe, sin embargo, una brecha perceptual entre el gloss real y los parámetros PBR en VR, lo que refuerza la necesidad de un flujo de calibración visual y colorimétrica [8]. El estudio se desplegó en Spatial.io mediante SDK para Unity, siguiendo una metodología de diseño iterativo en línea con trabajos previos sobre stands virtuales [9].

La contribución principal de esta comunicación reside en articular esos componentes —stand virtual, configurador de materiales, pipeline PBR y evaluación de experiencia de usuario— en un caso aplicado al producto cerámico. El entorno permite modificar acabados de suelo y pared en tiempo real, observarlos en escenas interiores y comparar la respuesta del sistema en dos formas de acceso: escritorio y realidad virtual inmersiva. Esta comparación resulta necesaria porque la inmersión no garantiza por sí misma una mejor experiencia global: puede aumentar el realismo percibido, pero también introducir costes de aprendizaje, dependencia del hardware, fatiga o necesidad de asistencia técnica. Por ello, el piloto se plantea como una evaluación inicial del equilibrio entre usabilidad, presencia, fidelidad visual y rendimiento computacional.

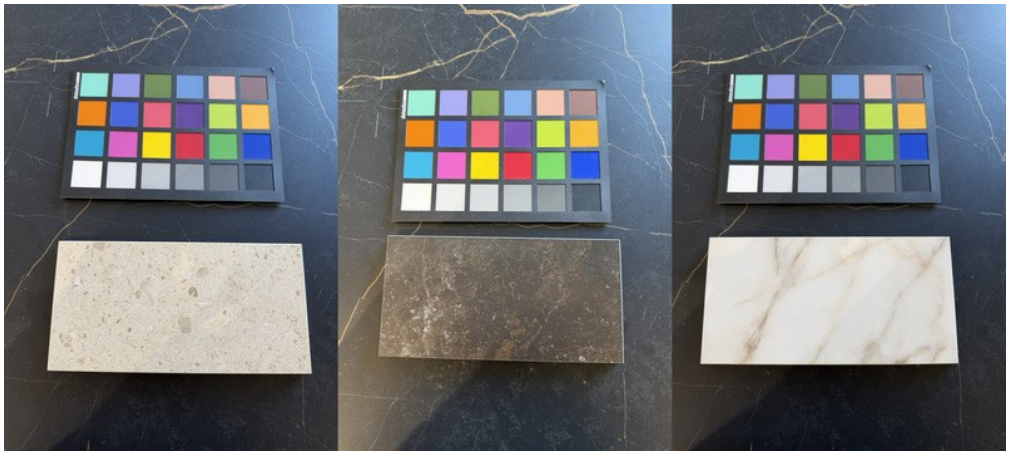


**Figura 1.** Captura de muestras físicas cerámicas con carta de color estandarizada (Spyder Checkr 24) para orientar el ajuste visual de materiales en el entorno inmersivo.

## OBJETIVOS

1. Diseñar un stand de realidad virtual orientado a gemelo digital para la exposición y configuración de productos cerámicos en el sector B2B/B2C.
2. Desarrollar un pipeline de activos 3D y materiales PBR con estándares: glTF 2.0, KHR_materials_variants y KHR_materials_clearcoat.

3. Implementar un flujo de trabajo de apariencia con referencias colorimétricas (Spyder Checkr 24, CIE/CIEDE2000) para el ajuste visual de materiales cerámicos.
4. Evaluar la usabilidad (SUS) y la presencia (IPQ) en dos condiciones: Versión Escritorio y Versión Inmersiva VR.
5. Analizar el perfil de rendimiento del entorno inmersivo en Meta Quest 3 con Performance Analyzer e identificar los factores limitantes para proponer optimizaciones.



**Figura 2.** Vista general del stand virtual: área de exposición, escenas contextuales y elementos de presentación de productos cerámicos.

## RESULTADOS

### Marco de evaluación del piloto

Sobre el mismo escenario inmersivo del stand, se realizaron 2 tipos de test. En el Test 1 se empleó la versión de escritorio; en Test 2, un visor de realidad virtual (HMD) con controladores. Los instrumentos fueron la System Usability Scale (SUS) y el Igroup Presence Questionnaire (IPQ). La Tabla 1 recoge el marco de evaluación extendido, distinguiendo variables medidas en el piloto y variables para iteraciones futuras.

**Tabla 1.** Marco de evaluación del stand VR cerámico: variables medidas y trabajo futuro.

| Dimensión | Métrica | Instrumento / Evento | Estado |
|---|---|---|---|
| Usabilidad | Puntuación SUS | Cuestionario SUS | Medido |
| Presencia | GP, SP, INV, REAL | IPQ | Medido |
| Apariencia | Flujo colorimétrico | Spyder Checkr 24 + CIEDE2000 | Referencia |
| Confort VR | SSQ | Simulator Sickness Questionnaire | Trabajo futuro |
| Impacto comercial | Conversión / leads | Telemetría / CRM | Trabajo futuro |

Nota. SSQ = Simulator Sickness Questionnaire. Las métricas de confort e impacto comercial no se reportan cuantitativamente en esta versión.

### Usabilidad (SUS)

La puntuación media del Test 1 fue 88,39 ± 5,34, frente a 77,68 ± 2,68 del Test 2. La diferencia apareada resultó de −10,71 puntos (IC 95 %: −13,79 a −7,64), estadísticamente significativa (Wilcoxon W = 0,00; p = 0,0014; t apareada: t = −7,54; p < 0,001). Los mayores deterioros en el Test 2 se observaron en necesidad de apoyo técnico (SUS4), manejo engorroso (SUS8) y aprendizaje previo (SUS10). La consistencia interna fue alta en ambas condiciones (α = 0,96 y α = 0,98 respectivamente).

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos y comparación apareada de usabilidad (SUS).

| Condición | n | SUS media ± DT | IC 95% |
|---|---|---|---|
| Test 1: Desktop/3Dconnexion | 14 | 88,39 ± 5,34 | [85,31; 91,47] |
| Test 2: Immersive VR | 14 | 77,68 ± 2,68 | [76,13; 79,23] |

Nota. Comparación mediante prueba de Wilcoxon apareada. DT = desviación típica; IC = intervalo de confianza.

### Presencia (IPQ)

Tras recodificar los ítems inversos del IPQ, el Test 2 mostró mayores puntuaciones en presencia espacial (SP: 5,20 ± 0,53 vs. 4,57 ± 0,66; p = 0,0328) y realismo experimentado (REAL: 5,11 ± 0,31 vs. 4,27 ± 0,97; p = 0,0073). La presencia general (GP) y la implicación (INV) no mostraron diferencias significativas. Tras corrección de Holm para comparaciones múltiples, únicamente REAL mantuvo la significación estadística. El Test 2 aportó mayor realismo y sensación de inmersión que el Test 1.

**Tabla 3.** Estadísticos descriptivos y comparación apareada de presencia (IPQ).

| Dimensión IPQ | Test 1 media ± DT | Test 2 media ± DT | Wilcoxon p |
|---|---|---|---|
| GP (presencia general) | 6,00 ± 1,52 | 6,50 ± 0,76 | 0,4166 |
| SP (presencia espacial) | 4,57 ± 0,66 | 5,20 ± 0,53 | 0,0328* |
| INV (implicación) | 4,93 ± 1,06 | 4,84 ± 0,46 | 0,8135 |
| REAL (realismo experimentado) | 4,27 ± 0,97 | 5,11 ± 0,31 | 0,0073** |
| IPQ Global corregido | 4,69 ± 0,35 | 5,16 ± 0,43 | 0,0170* |

** p < 0,05; ** p < 0,01 (corrección de Holm). GP = presencia general; SP = presencia espacial; INV = implicación; REAL = realismo experimentado.*




**Figura 3.** Menú lateral para modificar materiales de suelo en tiempo real dentro del entorno VR.




**Figura 4.** Menú lateral para modificar materiales de pared en tiempo real entorno VR.

### Rendimiento en Meta Quest 3

El análisis con Performance Analyzer confirmó 72-90 FPS en navegación estándar, con descensos a 65-70 FPS durante la interacción con el carrusel de materiales. No se detectaron caídas sostenidas que impidieran completar la sesión, pero el perfil temporal muestra que los cambios de variante son el momento de mayor exigencia computacional. El componente crítico es la GPU, con incrementos asociados a la aplicación de shaders PBR, mapas de textura y materiales con parámetros de reflectancia. La memoria RAM mostró un incremento progresivo al cargar variantes de material, con riesgo de fragmentación en sesiones largas o en catálogos más amplios. Estos resultados confirman la viabilidad del stand en Meta Quest 3 para un piloto controlado, aunque señalan la necesidad de optimización antes de escalar el número de colecciones, escenas o usuarios simultáneos.

Las optimizaciones propuestas son reducción selectiva de resolución de texturas, simplificación de shaders, compresión de mapas, uso de niveles de detalle y precarga controlada de variantes. También resulta recomendable limitar el número de materiales activos en memoria y separar el catálogo completo de las combinaciones realmente necesarias durante una sesión comercial.

### Conclusiones

En conjunto, los resultados evidencian un compromiso entre fidelidad visual, fluidez y facilidad de uso: la condición de escritorio maximiza la operatividad, mientras que la condición inmersiva aporta mayor realismo y comprensión espacial. La siguiente fase debería incorporar métricas de confort VR, telemetría de interacción y datos comerciales reales para determinar si el incremento de presencia se traduce en mejores decisiones de selección, reducción de muestras físicas o mayor eficacia en la prescripción.

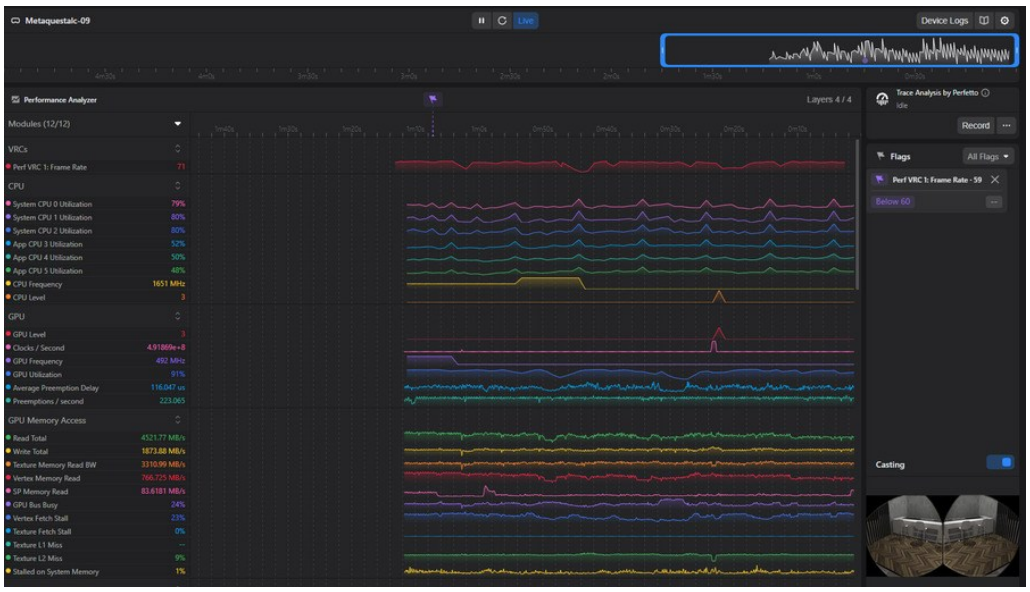



**Figura 5.** Perfil temporal de rendimiento (FPS y carga computacional) en Meta Quest 3 durante una sesión de navegación.

## REFERENCIAS


[1] Yoo, K.; Welden, R.; Hewett, K.; Haenlein, M. (2023). The merchants of meta: A research agenda to understand the future of retailing in the metaverse. Journal of Retailing, 99, 173-192. https://doi.org/10.1016/j.jretai.2023.02.002

[2] Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51, 1016-1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

[3] Flavián, C.; Ibáñez-Sánchez, S.; Orús, C. (2019). The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. Journal of Business Research, 100, 547-560. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.050

[4] Lee, K.-Y. (2012). Consumer Processing of Virtual Experience in E-Commerce. Computers in Human Behavior, 28, 2134-2142. https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.06.018

[5] Kang, H. J.; Shin, J.-h.; Ponto, K. (2020). How 3D Virtual Reality Stores Can Shape Consumer Purchase Decisions. Journal of Interactive Marketing, 49, 70-85. https://doi.org/10.1016/j.intmar.2019.07.002

[6] Jang, J. Y.; Hur, H. J.; Choo, H. J. (2019). How to Evoke Consumer Approach Intention toward VR Stores? Fashion and Textiles, 6, 12. https://doi.org/10.1186/s40691-018-0166-9

[7] Trentin, A.; Perin, E.; Forza, C. (2014). Increasing the Consumer-Perceived Benefits of a Mass-Customization Experience. Computers in Industry, 65, 693-705. https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.02.004

[8] Xiao, W.; Tan, T.; Xue, C. (2023). Gloss-Bridge: Reducing the Visual Perception Gap between Real-World Glossiness and PBR Reflectance Properties in VR. Applied Sciences, 13, 4722. https://doi.org/10.3390/app13084722

[9] Jover, V.; Sempere, S.; Ferrándiz, S. (2025). The Creation of Virtual Stands in the Metaverse: Applications for the Textile Sector. Electronics, 14, 359. https://doi.org/10.3390/electronics14020359

# COMUNICACIONES EN PÓSTER



# Nuevas cartografías eco-sociales: hacia una ecoestética crítica en los Parques Naturales de la Península Ibérica

**García Botella, Nieves de Montserrat**

*Doctorando (Universidad Miguel Hernández–Grupo de Investigación IAM-Lab), Departamento de Arte, Universidad Miguel Hernández, Avda. de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante). nieves.garcia02@goumh.umh.es*

## RESUMEN

Este artículo amplía y desarrolla algunos aspectos del plan de investigación doctoral Arte, ecología y territorio: Una investigación artística eco-social en los Parques Naturales de la Península Ibérica, desarrollado en el IAM-Lab de la Universidad Miguel Hernández bajo la codirección de Teresa Marín García y Elisa Lozano Chiarlones. La investigación propone el arte como forma de conocimiento situado capaz de mediar simbólica y políticamente entre cultura y naturaleza en el contexto de la crisis climática. Tiene como espacio nuclear el Parque Natural El Hondo de Elche y se extiende a otros enclaves naturales protegidos de la Península, con el propósito de deconstruir los modelos de conocimiento extractivistas para generar imaginarios alternativos que fomenten una relación ética entre seres humanos y naturaleza. Desde el paradigma de la investigación basada en la práctica artística, la propuesta articula tres niveles: investigación teórica en torno a la ecoestética crítica, el pensamiento ecofeminista y la ficción especulativa; trabajo de campo empírico y sensorial; y producción artística mediante instalaciones y videoinstalaciones específicas del emplazamiento. El glitch y el color #FF00FF operan como estrategias estéticas y epistemológicas que metaforizan el colapso ecológico.

**Palabras clave:** investigación artística; arte y ecología; eco-social; parques naturales; ecoestética crítica; *glitch;* práctica artística.

## INTRODUCCIÓN

El territorio no es solo un fondo sobre el que ocurren las cosas: es un tejido de relaciones, memorias y procesos en permanente transformación. Los parques naturales de la península ibérica —ecosistemas de alto valor ecológico y simbólico— llevan décadas absorbiendo los efectos del cambio climático, la presión urbanística y los modelos de producción extractivistas. Documentar esa presión no basta. Comprenderla tampoco. Hace falta, además, construir formas de percepción y de vínculo que permitan a las comunidades humanas relacionarse de otro modo con los ecosistemas que habitan.

Esta es la apuesta central de la investigación doctoral que se presenta: que el arte puede ser una de esas formas. No el arte como ilustración de datos ecológicos ni como amplificador del activismo ambiental —aunque pueda dialogar con ambos—, sino el arte como conocimiento situado [1]: una forma de saber que nace de la presencia corporal en el territorio, de la escucha de los procesos no humanos, de la disposición a ser afectado por lo que los ecosistemas comunican antes de que podamos conceptualizarlo.

El plan de investigación Arte, ecología y territorio: una investigación artística eco-social en los Parques Naturales de la Península Ibérica se desarrolla en el IAM-Lab

(Universidad Miguel Hernández) bajo la codirección de Teresa Marín García y Elisa Lozano Chiarlones. Tiene como espacio de estudio principal el Parque Natural El Hondo de Elche y se apoya en una genealogía de obra propia desarrollada entre 2021 y 2025 en distintos enclaves naturales amenazados. Este artículo presenta sus fundamentos teóricos, sus objetivos, su diseño metodológico y su inserción en las líneas de investigación del grupo de acogida.

## MARCO CONCEPTUAL: ECOESTÉTICA, TERRITORIO Y CONOCIMIENTO SITUADO

### Del land art al arte eco-social: una genealogía crítica

La noción de arte ecológico ha recorrido un largo trayecto desde las primeras intervenciones del land art en los años sesenta y setenta —que pusieron en tensión el espacio del arte con el espacio de la naturaleza— hasta las formas contemporáneas de ecoartivismo y práctica relacional, vinculadas a los movimientos sociales y a la pedagogía crítica [2, 3, 4]. En este recorrido se ha producido un desplazamiento fundamental: de la representación del paisaje como objeto contemplativo a la co-creación con los ecosistemas y las comunidades como sujetos del proceso artístico. El arte ya no habla de la naturaleza: aprende con ella.

Ardenne [5] ha caracterizado este giro señalando que el arte ecológico contemporáneo no busca producir obras bellas sobre la crisis ambiental, sino instalar al espectador en la textura misma del problema. La ecoestética crítica que articula esta investigación —en diálogo con Miles [3] y Kagan [6]— no aplica categorías estéticas a objetos naturales: es una práctica de co-creación de sentido con el medio, que asume la dimensión política de la percepción.

### Pensamiento situado, ecofeminismo e interdependencia

La investigación se inscribe teóricamente en el giro posthumano y multiespecie que autoras como Donna Haraway [7] y Rosi Braidotti [8] han impulsado en las últimas décadas. Haraway introduce el concepto de *Chthuluceno* como alternativa narrativa al Antropoceno: un tiempo que no gira en torno a la agencia humana, sino a la red de relaciones de cuidado y colaboración entre especies. Bruno Latour [9], desde una perspectiva complementaria, propone la noción de actor-red para subrayar que los no humanos —los ecosistemas, los organismos, los procesos geológicos— no son meros objetos de la acción humana, sino actores que co-producen el mundo.

El pensamiento ecofeminista aporta a esta base teórica una ética del cuidado [10] que conecta la crisis ecológica con la crisis de los sistemas de cuidado: ambas son manifestaciones de un mismo modelo que prioriza la extracción y la acumulación sobre la reciprocidad y la sostenibilidad de la vida.

### Ficción especulativa y (de)construcción del paisaje

Un tercer eje teórico es la ficción especulativa, en el sentido que Haraway articula bajo el acrónimo SF: ciencia ficción, hechos científicos, feminismo especulativo, fabricación de cuerdas. No es evasión sino forma de conocimiento: allí donde el dato estadístico constata la pérdida, la ficción especulativa imagina las formas de vida que podrían persistir, mutar, nacer desde las ruinas [11]. En la investigación que se presenta, esta metodología orienta tanto el trabajo de campo —construyendo una escucha atenta a señales que exceden los marcos perceptivos habituales— como la producción artística, generando experiencias sensoriales en las que el espectador puede habitar, transitoriamente, otras formas de relacionarse con lo no humano.

## ANTECEDENTES ARTÍSTICOS: UNA GENEALOGÍA DE OBRA PROPIA (2021–2025)

La investigación no parte de cero. Entre 2021 y 2025 se ha desarrollado una serie de proyectos artísticos en distintos parques naturales ibéricos que constituyen el sustrato empírico, formal y conceptual de la tesis. Cada pieza ha contribuido a depurar un vocabulario visual progresivamente menos dependiente de la ilustración del dato y más orientado a la construcción de experiencias sensoriales que instalen al espectador en la textura del problema ecológico.

La primera pieza, *Mar Mayor* (2021), es una instalación site-específica desarrollada en la Universidad Miguel Hernández (Elche) que aborda la degradación del Mar Menor y la contaminación derivada de la agricultura intensiva. La segunda, *ADALSUUD. El poder transformador del arte* (2023), videoinstalación centrada en el Parque Natural de El Hondo —espacio nuclear de la tesis—, introduce la proyección inmersiva como estrategia para crear una co-presencia entre espectador y ecosistema en crisis.



**Figura 1.** Detalle de videoinstalación *ADALSUUD. El poder transformador del arte,*(2023). Universidad Miguel Hernández.

La tercera, *Collserola. Parábola de un progreso de dorada apariencia* (2024), aborda la sequía y la sobreexplotación hídrica en el Parc Natural de Collserola, incorporando la crítica explícita al modelo de progreso como eje conceptual. En ella aparece por primera vez el *glitch* —el error digital, la interrupción del flujo— como metáfora formal del desequilibrio ecológico.

La cuarta y más reciente, *#FF00FF. Todo Comenzar se da en el delirio* (2025), videoinstalación también en Collserola, articula de forma más explícita todos los ejes de la tesis. El color #FF00FF —magenta puro, inexistente en el espectro visible de la naturaleza, pero omnipresente en los entornos digitales como señal de error o textura ausente— opera como semiótica del umbral: alarma cromática en ecosistemas perturbados, marca de ausencia en los mundos virtuales.

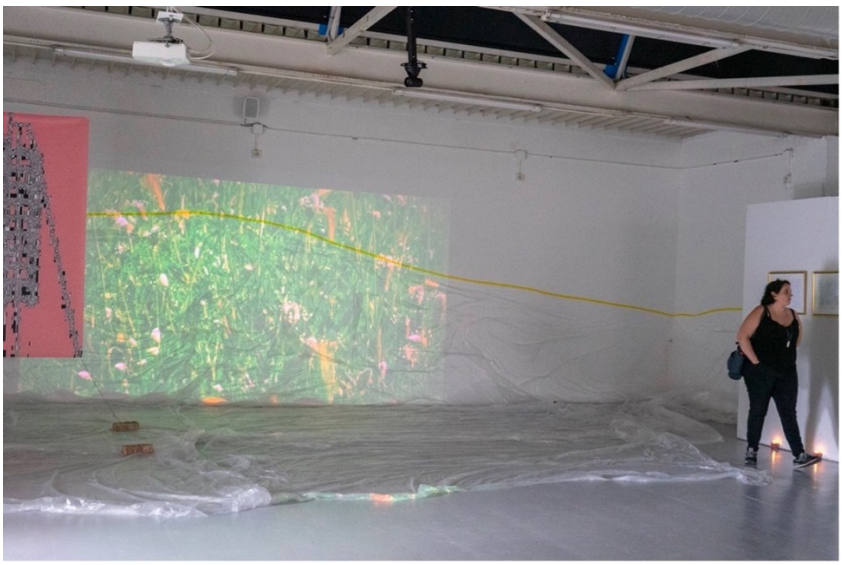


**Figura 2.** Detalle de videoinstalación *#FF00FF. Todo Comenzar se da en el Delirio*,(2025). Universidad de Barcelona.

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

EL objetivo general es analizar y desarrollar metodologías críticas en las prácticas artísticas eco-sociales que contribuyan a la reconstrucción simbólica y material del vínculo entre arte y ecología, consolidando un modelo de investigación artística que combine producción estética, reflexión teórica y acción social en parques naturales de la Península ibérica.

Los seis objetivos específicos son:

Examinar las transformaciones del pensamiento ecológico contemporáneo y su influencia en las prácticas artísticas actuales.

Desarrollar una metodología artística interdisciplinar que integre observación científica, ficción especulativa e instalación como medios de producción crítica.

Producir obras que funcionen cómo dispositivos de mediación entre comunidades humanas y ecosistemas naturales.

Establecer un marco teórico y visual que articule la noción de ecoestética crítica como práctica de reparación simbólica frente a la crisis ambiental.

Generar un archivo visual y documental de las experiencias artísticas desarrolladas.

Contribuir al debate sobre la investigación artística eco-social en el contexto español y europeo mediante publicaciones, congresos y exposiciones.

## DISEÑO METODOLÓGICO

### Investigación basada en la práctica artística

La investigación se desarrolla desde el paradigma de la investigación basada en la práctica artística, que articula el proceso creativo como modo de producción de conocimiento [12, 13, 14]. En este paradigma, la obra no ilustra conclusiones previas: las genera en el proceso mismo de su creación. La metodología es recursiva —cada

fase retroalimenta y transforma las anteriores— y asume una perspectiva cualitativa, interpretativa y transdisciplinar que integra saberes de las artes, las ciencias ambientales y la filosofía ecofeminista.

### Fases de la investigación

La Fase I (Documentación y fundamentación teórica) comprende la revisión bibliográfica exhaustiva sobre arte eco-social, pensamiento decolonial y metodologías de ficción especulativa. La Fase II (Trabajo de campo y registro) desarrolla acciones artísticas situadas en el Parque Natural de El Hondo y otros Parques Naturales, empleando cuadernos de campo visuales, fotografía, video y captura sonora. La Fase III (Producción artística) desarrolla la serie principal de videoinstalaciones e instalaciones híbridas, experimentando con el color magenta #FF00FF y la estética del error digital (*glitch*) como metáforas del colapso ecológico. La Fase IV (Análisis, síntesis y difusión) sistematiza los resultados, redactar la memoria doctoral, organizar la exposición final y publicar los resultados en revistas indexadas.

### Técnicas, recursos e integración de la ficción especulativa

Las técnicas empleadas incluyen registro audiovisual, cuadernos de campo y diarios de proceso, recolección de materiales in situ (plásticos, piedras, agua, tierra), análisis de color y textura como variables expresivas, software de edición de imagen, y entrevistas con agentes locales —guardas del parque, biólogos, comunidades de vecinos— como fuentes de saberes situados.

La ficción especulativa se integra como recurso de construcción simbólica: permite plantear narrativas de futuro, posibles o distópicas, que interrogan los modos de vida contemporáneos y sugieren alternativas de convivencia planetaria [15]. Su empleo en la instalación y el video refuerza la capacidad del arte para activar la imaginación crítica: no como evasión, sino como extensión del conocimiento hacia lo que todavía no tiene nombre.

## VINCULACIÓN CON EL IAM-LAB

La investigación se desarrolla en el Laboratorio de Interferencias Artísticas y Mediales (IAM-Lab), grupo consolidado adscrito al Centro de Investigación en Arte (CíA) y al Departamento de Arte de la Universidad Miguel Hernández, coordinado por la catedrática Teresa Marín García. Fundado en 2011, IAM-Lab propone la interferencia como estrategia metodológica: acción disruptiva que cuestiona inercias culturales y genera transformaciones constructivas [16].

La investigación contribuirá al desarrollo teórico del grupo y a su proyección internacional mediante publicaciones en revistas indexadas, participación en congresos y talleres sobre metodologías eco-artísticas. Entre las publicaciones de referencia del grupo directamente relevantes para la tesis destaca Marín García [17], Imágenes de lo frágil. Imaginación y catástrofe, que establece el marco conceptual de la fragilidad y el colapso desde el que la investigación dialoga.

## CONCLUSIONES

### La pertinencia del arte eco-social como investigación

La crisis ecológica no es solo un problema técnico ni político: es también una crisis de percepción y de imaginario. Los modelos de conocimiento extractivistas que han

producido el deterioro de los ecosistemas son los mismos que dificultan su comprensión cabal y su transformación. El arte eco-social, en la medida en que genera formas alternativas de percibir y relacionarse con el territorio, puede contribuir a construir las condiciones culturales desde las cuales otras formas de vida resulten imaginables.

La investigación que se presenta no aborda este desafío de manera abstracta, sino desde la especificidad de los parques naturales ibéricos. Cada uno de estos territorios es un laboratorio en el que los procesos de deterioro y resiliencia son observables en escalas que el trabajo de campo artístico puede capturar con una sensibilidad que otros lenguajes no alcanzan.

La investigación basada en la práctica artística, articulada desde la ecoestética crítica, el pensamiento ecofeminista y la ficción especulativa, no pretende resolver la crisis ecológica. Pretende algo más modesto y necesario: crear espacios de experiencia en los que esa crisis pueda ser sentida, pensada y compartida de formas que los lenguajes científicos y políticos, por sí solos, no pueden generar.

## REFERENCIAS

[1] Haraway, D. (2019). Seguir con el problema. Generar parentesco en el Chthuluceno. Consonni.

[2] Gablik, S. (1991). The reenchantment of art. Thames & Hudson.

[3] Miles, M. (2014). Eco-aesthetics: Art, literature and architecture in a period of climate change. Bloomsbury.

[4] Parreño, J. M.; Raquejo, T. (Eds.) (2015). Arte y ecología. UNED.

[5] Ardenne, P. (2022). Un arte ecológico: Creación plástica y Antropoceno. Adriana Hidalgo.

[6] Kagan, S. (2011). Art and sustainability: Connecting patterns for a culture of complexity. transcript Verlag.

[7] Haraway, D. (2019). Seguir con el problema. Generar parentesco en el Chthuluceno. Consonni.

[8] Braidotti, R. (2019). Posthuman knowledge. Polity Press.

[9] Latour, B. (2008). Reensamblar lo social: Una introducción a la teoría del actor-red. Manantial.

[10] Tronto, J. C. (2018). ¿Quién cuida? Cómo repensar un mundo justo. Katz Editores.

[11] Tsing, A. L. (2021). La seta del fin del mundo. Capitán Swing.

[12] Sullivan, G. (2010). Art practice as research: Inquiry in visual arts (2nd ed.). SAGE Publications.

[13] Biggs, M.; Büchler, D. (2008). "Eight criteria for practice-based research in the creative and cultural industries". Art, Design & Communication in Higher Education, v. 7, n. 1, p. 5–18. http://dx.doi.org/10.1386/adch.7.1.5_1

[14] Borgdorff, H. (2012). The conflict of the faculties: Perspectives on artistic research and academia. Leiden University Press.

[15] Harari, Y. N. (2016). Homo Deus: Breve historia del mañana. Debate.

[16] Marín García, T. (2019). Las interferencias como metodología de creación artística. Universidad Miguel Hernández.

[17] Marín García, T. (2024). Imágenes de lo frágil. Imaginación y catástrofe. InterdisciplinARS. http://dx.doi.org/10.4995/INT.2024.677101

# Propiedades elásticas de $CdCrO_4$ bajo presión implicaciones en la estabilidad estructural

**Vilaplana, Rosario I.[1], Muñoz, Alfonso[2], Popescu, Constantin[3], Errandonea, Daniel[4]**

(1) *Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, València, España, rovilap@fis.upv.es*
(2) *Departamento de Física, Universidad de La Laguna, Tenerife, España, amunoz@ull.edu.es*
(3) *CELLS-ALBA Synchrotron Light Facility, Cerdanyola del Vallès, España, cpopescu@cells.es*
(4) *Departamento de Física Aplicada, Universitat de València, Burjassot, España, Daniel.Errandonea@uv.es*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de las propiedades elásticas del cromato de cadmio, $CdCrO_4$, bajo condiciones de presión moderada, así como su relación con la estabilidad estructural, determinada mediante difracción de rayos X a alta presión. $CdCrO_4$ cristaliza a presión ambiente en una fase ortorrómbica del tipo $CrVO_4$, caracterizada por una red abierta y una rigidez volumétrica relativamente baja. Los experimentos de difracción de rayos X realizados en celda de yunques de diamante muestran que esta fase es estable hasta aproximadamente 4 GPa, donde se produce una transición estructural irreversible hacia una fase tetragonal tipo chelita, acompañada de un colapso volumétrico significativo y de un aumento de la coordinación del catión Cd. Los ajustes de la ecuación de estado y el análisis del tensor elástico, obtenidos mediante cálculos de primeros principios, revelan que la fase de baja presión presenta una inestabilidad mecánica alrededor de 2.5 GPa, lo que anticipa la transición estructural observada experimentalmente. Por el contrario, la fase chelita resulta mecánicamente estable incluso al extrapolar sus constantes elásticas a la presión ambiente, lo que ofrece una explicación coherente de la irreversibilidad del proceso. Estos resultados ponen de manifiesto el papel fundamental de las propiedades elásticas como precursoras de transiciones estructurales inducidas por la presión en óxidos del tipo $ABO_4$.

**Palabras clave**: $CdCrO_4$; alta presión; propiedades elásticas; estabilidad mecánica; difracción de rayos X; transición estructural.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de alta presión (HP) se ha consolidado como una herramienta fundamental en el estudio de materiales sólidos, ya que permite modificar de forma controlada las distancias interatómicas sin alterar la composición química. En óxidos complejos, la presión puede inducir transformaciones estructurales que afectan directamente las propiedades electrónicas, vibracionales y mecánicas del sólido. En este contexto, el análisis conjunto de la respuesta estructural y del comportamiento elástico proporciona información clave sobre los mecanismos que rigen la estabilidad y las transiciones de fase.

Los compuestos del tipo $ABO_4$ presentan una gran diversidad estructural a presión ambiente, adoptando configuraciones como zircon, monacita, $CrVO_4$, barita o chelita, dependiendo principalmente del tamaño y la naturaleza del catión A. Bajo compresión, muchos de estos materiales evolucionan hacia fases más densas, generalmente asociadas a un aumento de la coordinación catiónica y a un endurecimiento significativo de la red cristalina [1,2]. En numerosos sistemas se ha demostrado que las transiciones estructurales están precedidas por la aparición de inestabilidades elásticas, identificables por la violación de los criterios de estabilidad mecánica de Born [3].

En el caso de los cromatos $ACrO_4$, numerosos estudios han puesto de manifiesto la riqueza de su comportamiento bajo presión. Sin embargo, el cromato de cadmio, $CdCrO_4$, ha recibido relativamente poca atención, a pesar de presentar una estructura del tipo $CrVO_4$ particularmente abierta y, por tanto, potencialmente susceptible a transformaciones inducidas por la presión. El presente trabajo aborda esta laguna mediante un estudio sistemático de la respuesta elástica y estructural de $CdCrO_4$ bajo compresión.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es establecer la relación entre las propiedades elásticas de $CdCrO_4$ y su estabilidad estructural bajo presión. De forma más específica, se persigue: (i) caracterizar experimentalmente la evolución estructural de $CdCrO_4$ bajo presión mediante difracción de rayos X; (ii) determinar la ecuación de estado de las fases de baja y alta presión; (iii) calcular el tensor completo de constantes elásticas y evaluar la estabilidad mecánica de ambas fases; y (iv) identificar posibles inestabilidades elásticas que actúen como precursoras de la transición estructural observada.

## METODOLOGÍA

Los experimentos de difracción de rayos X a alta presión se realizaron empleando radiación sincrotrón y una celda de yunques de diamante, con un medio transmisor de presión casi hidrostático. Los patrones de difracción se analizaron mediante refinamientos de Rietveld, lo que permitió identificar las fases (Tabla 1) los parámetros de red y la evolución del volumen de la celda unidad en función de la presión (Tabla 2). Las compresibilidades axiales se determinaron a partir de los ajustes lineales de a(P), b(P) y c(P) en el intervalo de estabilidad de la fase α y chelita (Tabla 3). Los datos de presión–volumen se ajustaron mediante la ecuación de estado de Birch–Murnaghan de tercer orden [4].

Las propiedades elásticas se calcularon mediante cálculos de primeros principios basados en la teoría del funcional de la densidad. El tensor completo de constantes elásticas se obtuvo mediante deformaciones finitas en la celda cristalina y la evaluación de la respuesta tensional. A partir de estas constantes se calcularon los módulos policristalinos de Voigt–Reuss–Hill y se evaluaron los criterios de estabilidad mecánica correspondientes a la simetría cristalina de cada fase.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de difracción de rayos X muestran que la fase ortorrómbica α-$CdCrO_4$ es estable hasta aproximadamente 3 GPa. En este intervalo de presiones, la compresión de la red es continua y anisótropa, lo que refleja la flexibilidad inherente de la estructura tipo $CrVO_4$. El ajuste de la ecuación de estado proporciona un módulo volumétrico relativamente bajo, coherente con la naturaleza abierta de la red cristalina.

Alrededor de 3–4 GPa se observan nuevos picos de difracción en el difractograma que corresponden a una fase tetragonal de tipo chelita. Esta transformación va acompañada de un colapso volumétrico significativo (19%) y de un aumento de la coordinación del Cd de 6 a 8. La ausencia de recuperación de la fase ortorrómbica tras la descompresión confirma el carácter irreversible de la transición (Figura 1).

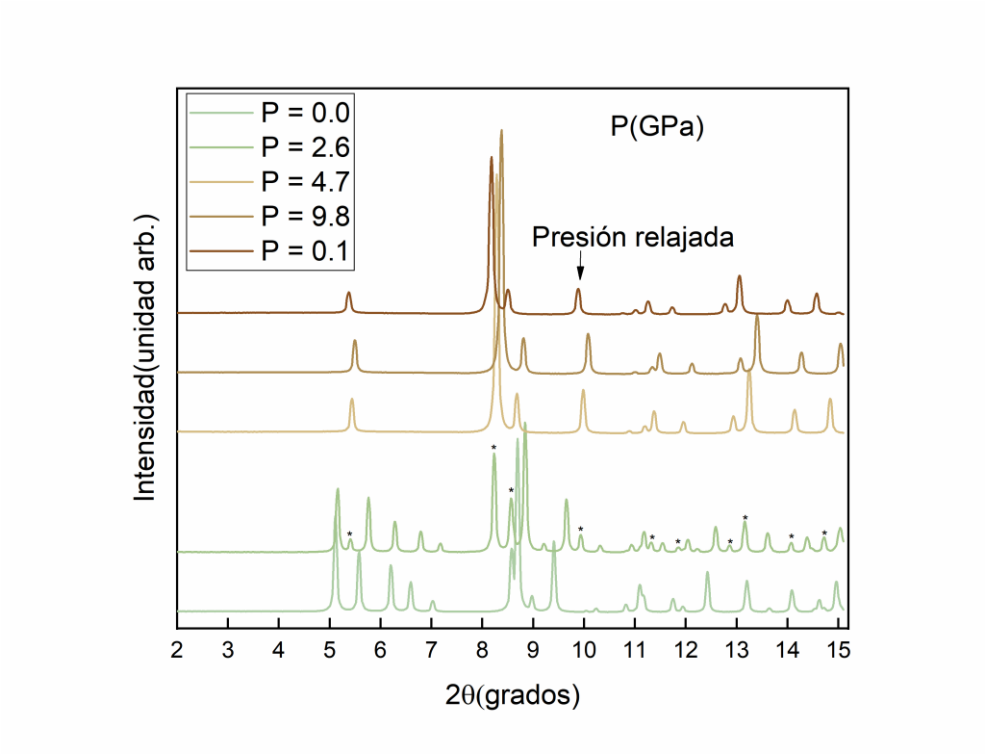



**Figura 1**. Difractogramas de rayos X de $CdCrO_4$ bajo presión, que muestran la evolución de la fase α, la aparición de la fase tipo chelita y su retención tras la descompresión.

El análisis elástico revela que α-$CdCrO_4$ cumple todos los criterios de estabilidad mecánica a presión ambiente. No obstante, al aumentar la presión hasta 2.5 GPa, uno de los autovalores del tensor elástico se vuelve negativo, lo que indica la pérdida de estabilidad mecánica de la fase ortorrómbica (Tabla 4). En la Tabla 4 se muestran únicamente las constantes elásticas $C_{22}$ y $C_{23}$, ya que son las responsables directas de la violación de los criterios de estabilidad mecánica de Born y del colapso de un autovalor del tensor elástico en la fase α-$CdCrO_4$. Esta inestabilidad aparece ligeramente por debajo de la presión de transición observada experimentalmente, lo que sugiere que actúa como un precursor mecánico de la transformación estructural.

En contraste, la fase tipo chelita presenta un tensor elástico positivo y satisface los criterios de estabilidad tanto a alta presión (Tabla 5) como al extrapolar sus constantes elásticas a la presión ambiente (Tabla 6). Este comportamiento explica de manera natural la retención metastable de la fase chelita tras la descompresión. En la Tabla 5 se presentan todas las constantes elásticas independientes de la fase chelita a alta presión, cuyo objetivo es caracterizar completamente la respuesta mecánica de la fase estable bajo condiciones de compresión. En la Tabla 6 se muestran únicamente los módulos policristalinos $B_H$ y $G_H$, junto con los autovalores del tensor elástico, ya que estos parámetros son suficientes para demostrar la estabilidad mecánica de la fase chelita extrapolada a presión ambiente. Este comportamiento es consistente con lo observado en otros cromatos del tipo $ABO_4$, como $SrCrO_4$, bajo compresión [5], y explica la retención metastable de la fase de alta presión tras la descompresión.

## TABLAS RESUMEN

**Tabla 1**. Tipo de estructura, grupo espacial y número, número de fórmulas por celda (Z) y figura de las fases de las estructuras de $CdCrO_4$.

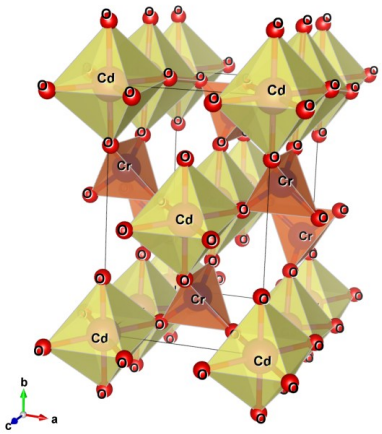
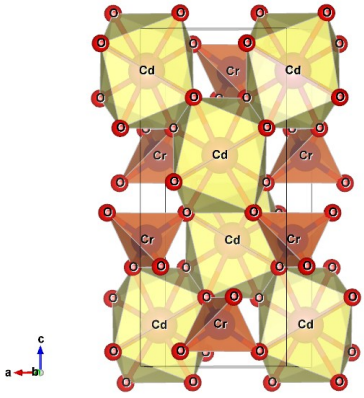
| Fase | Tipo estructural | Grupo espacial | Nº del grupo | Z | Figura |
|---|---|---|---|---|---|
| **α-$CdCrO_4$** | $CrVO_4$-type (ortorrómbica) | Cmcm | 63 | 4 |  |
| **$CdCrO_4$ (HP)** | Scheelite-type (tetragonal) | $I4_1/a$ | 88 | 4 |  |

**Tabla 2**. Parámetros experimentales de la ecuación de estado (Birch–Murnaghan 3º orden).

| Fase | P (GPa) | $V_0$ (Å³) | $B_0$ (GPa) | $B_0$' |
|---|---|---|---|---|
| **α-$CdCrO_4$** | 1–3.3 | 343.0 | 47 | 3 |
| **Chelita (HP)** | 1–11 | 279 | 92 | 8 |

**Tabla 3**. Compresibilidades axiales experimentales de α-$CdCrO_4$.

| Fase | Eje | κ ($10^{-3}$ $GPa^{-1}$) | Signo | Interpretación |
|---|---|---|---|---|
| **α-$CdCrO_4$** | a | −0.8 | Negativo | Expansión nula |
| | b | 12.6 | Positivo | Eje más compresible |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | c | 7.7 | Positivo | Compresión moderada |
| **Chelita (HP)** | a=b | 1.92 | Positivo | Eje menos compresible |
| | c | 3.1 | Positivo | Eje más compresible |

**Tabla 4**. Constantes elásticas clave de α-$CdCrO_4$ (0 y 2.5 GPa).

| **Parámetro** | **0 GPa** | **2.5 GPa** | **Estado** |
|---|---|---|---|
| **$C_{22}$** | 76.6 | 0.94 | ↓ |
| **$C_{23}$** | 23.9 | −18.0 | cambia signo |
| **Autovalor $\lambda_3$** | + | −8.5 | Inestable |

**Tabla 5.** Constantes elásticas $C_{ij}$ y módulos VRH de $CdCrO_4$ tipo scheelita a 5.4 GPa.

| **Magnitud** | **Valor** | **Unidades** | **Comentario** |
|---|---|---|---|
| **$C_{11}$** | 160.0 | GPa | Rigidez alta |
| **$C_{12}$** | 80.3 | GPa | |
| **$C_{13}$** | 75.4 | GPa | |
| **$C_{33}$** | 110.2 | GPa | |
| **$C_{44}$** | 29.4 | GPa | |
| **$C_{66}$** | 46.4 | GPa | |
| **$B_H$** | 97.1 | GPa | Estable |
| **$G_H$** | 33.2 | GPa | |
| **E** | 89.4 | GPa | |
| **v** | 0.347 | – | Dúctil |

**Tabla 6**. Estabilidad elástica de la fase chelita extrapolada a 0 GPa.

| **Parámetro** | **Valor** | **Criterio** | **Estado** |
|---|---|---|---|
| **$B_H$** | 72.3 | B>0 | Estable |
| **$G_H$** | 28.4 | G>0 | Estable |
| **Autovalores** | >0 | Born tetragonal | Estable |

## CONCLUSIONES

El estudio combinado experimental y teórico demuestra que la transición estructural inducida por la presión en $CdCrO_4$ está gobernada por una inestabilidad elástica de la fase ortorrómbica a bajas presiones. La aparición de dicha inestabilidad a 2.5 GPa anticipa la transformación irreversible hacia la fase tipo chelita observada experimentalmente a presiones ligeramente superiores. La estabilidad mecánica intrínseca de la fase chelita, incluso a presión ambiente, explica de manera consistente la irreversibilidad del proceso. Este trabajo resalta la utilidad del análisis de las propiedades elásticas como herramienta predictiva para el estudio de las transiciones estructurales inducidas por la presión en óxidos complejos.

## REFERENCIAS

[1] Errandonea, Daniel; Manjón, Francisco J. (2008). “Pressure effects on the structural and electronic properties of $ABX_4$ scintillating crystals”. *Progress in Materials Science*, v. 53, n. 4, p.p. 711–773. http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.08.002

[2] Errandonea, Daniel; Garg, Alka B. (2018). “Recent progress on the characterization of the high-pressure behavior of $AVO_4$ orthovanadates”. *Progress in Materials Science*, v. 97, n. 1, p.p. 123–169. http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.004

[3] Mouhat, Florian; Coudert, François-Xavier (2014). “Necessary and sufficient elastic stability conditions in various crystal systems”. *Physical Review B*, v. 90, n. 22, p.p. 224104. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.224104

[4] Birch, Francis (1938). “The effect of pressure upon the elastic parameters of isotropic solids, according to Murnaghan’s theory of finite strain”. *Journal of Applied Physics*, v. 9, n. 4, p.p. 279–288. http://dx.doi.org/10.1063/1.1710429

[5] Gleissner, Johannes; Errandonea, Daniel; Segura, Antonio; Pellicer-Porres, Juan; Rodríguez-Hernández, Pedro; Muñoz, Alfonso (2016). “Monazite-type $SrCrO_4$ under compression”. *Physical Review B*, v. 94, n. 13, p.p. 134108. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.94.134108

# Mezclas termoplásticas de zeína/dextrano plastificadas con dietilenglicol para envases sostenibles

**Gomez-Caturla, Jaume[(1)], García-Sanoguera, David [(1)], Sánchez-Nacher, Lourdes[(1)], Ivorra-Martinez, Juan[(1)]**

*(1) Instituto de tecnología de materiales, departamento de ingeniería mecánica y de materiales, Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España: jaugoca@epsa.upv.es; dagarsa@epsa.upv.es; lsanchez@mcm.upv.es; juaivmar@doctor.upv.es*

## RESUMEN

En este trabajo se desarrollan mezclas termoplásticas basadas en zeína y dextrano, empleando dietilenglicol (DEG) como agente plastificante y compatibilizante, mediante procesos convencionales de extrusión e inyección. El objetivo es evaluar el efecto del contenido de dextrano sobre las propiedades mecánicas, el comportamiento termomecánico y la biodegradabilidad de estos materiales para su posible aplicación en envases sostenibles. Los resultados muestran que la incorporación de bajos contenidos de dextrano produce un efecto rigidizante, aumentando la resistencia a tracción hasta 14.0 MPa para la formulación Zeina-2.5Dex. Sin embargo, contenidos más elevados favorecen la ductilidad y la tenacidad, destacando Zeina-20Dex, que alcanza un alargamiento a la rotura del 82.6% y no rompe durante el ensayo de impacto. El análisis DMTA confirma una reducción de la rigidez y un aumento de la movilidad molecular a altos contenidos de dextrano. Además, todos los materiales superan el 90% de desintegración en compost y alcanzan prácticamente la desintegración completa tras 7 semanas.

**Palabras clave:** zeína, dextrano, extrusión, inyección, proteína, polisacárido, biodegradable

## INTRODUCCIÓN

La creciente acumulación de residuos plásticos derivados de fuentes fósiles ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales poliméricos de origen renovable, biodegradables y procesables mediante tecnologías convencionales. En este contexto, los biopolímeros naturales, especialmente proteínas y polisacáridos, han adquirido un gran interés para aplicaciones de envase sostenible debido a su disponibilidad, baja o nula toxicidad y capacidad para producir materiales sostenibles funcionales [3; 5].

Entre ellos, la zeína, una proteína hidrofóbica extraída del maíz, destaca por su biodegradabilidad, biocompatibilidad y potencial aplicación en recubrimientos, películas y sistemas de envasado alimentario [2]. Sin embargo, su procesabilidad y sus propiedades mecánicas pueden verse limitadas si no se emplean plastificantes adecuados. Por otro lado, el dextrano es un polisacárido hidrofílico de origen microbiano, ampliamente utilizado en los sectores alimentario y biomédico, cuya elevada afinidad por el agua puede favorecer la biodegradación y modificar la respuesta mecánica de las matrices poliméricas [1].

La combinación de proteínas y polisacáridos permite diseñar materiales con propiedades ajustables, aunque la diferente naturaleza química de ambos componentes puede generar problemas de compatibilidad. En este sentido, el uso de plastificantes como el dietilenglicol (DEG) puede facilitar tanto el procesado como la interacción entre

fases, actuando como agente plastificante y compatibilizante. Aunque existen trabajos previos sobre sistemas basados en zeína o mezclas zeína/polisacárido obtenidas principalmente mediante técnicas de laboratorio, el procesado por extrusión e inyección sigue siendo una vía menos explorada y de mayor interés industrial [4].

Por ello, en este trabajo se desarrollan mezclas termoplásticas de zeína/dextrano plastificadas con DEG mediante extrusión e inyección, evaluando el efecto del contenido de dextrano sobre sus propiedades mecánicas, comportamiento termomecánico y biodegradabilidad en condiciones de compost. El objetivo es valorar su potencial como materiales biodegradables y procesables para aplicaciones de envase sostenible.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar mezclas termoplásticas basadas en zeína y dextrano, empleando dietilenglicol (DEG) como plastificante y compatibilizante, mediante procesos convencionales de extrusión e inyección. Con ello se pretende obtener materiales de origen natural, procesables y biodegradables con potencial aplicación en el sector del envase sostenible.

De forma específica, se pretende evaluar el efecto del contenido de dextrano sobre las propiedades mecánicas, el comportamiento termomecánico y la capacidad de desintegración en condiciones controladas de compostaje.

## RESULTADOS

### Propiedades mecánicas

Los resultados mecánicos de las mezclas zeína/dextrano plastificadas con DEG se recogen en la **Tabla 1**. La zeína plastificada presentó una resistencia a tracción de 8.0 MPa, un elevado alargamiento a la rotura de 81.5% y una resiliencia de 8.1 kJ/m², evidenciando un comportamiento dúctil. La incorporación de un bajo contenido de dextrano produjo un efecto rigidizante, especialmente en la formulación Zeina-2.5Dex, que alcanzó la mayor resistencia a tracción, con 14.0 MPa, aunque con una marcada reducción del alargamiento hasta 13.7%.

Al aumentar el contenido de dextrano, la resistencia a tracción disminuyó progresivamente, mientras que la deformabilidad se recuperó. En particular, Zeina-20Dex mostró la menor resistencia, 4.1 MPa, pero el mayor alargamiento a la rotura, 82.6%, y no rompió durante el ensayo de impacto. Este comportamiento indica una mejora notable de la ductilidad y tenacidad a altos contenidos de dextrano.

La dureza Shore D aumentó en las formulaciones con 2.5-10% de dextrano, con valores superiores a 51, lo que confirma el efecto rigidizante inicial del polisacárido. Sin embargo, en Zeína-20Dex la dureza descendió hasta 42,4, en concordancia con su mayor flexibilidad. En conjunto, estos resultados demuestran que el contenido de dextrano permite modular el comportamiento mecánico de las mezclas, desde sistemas más rígidos y resistentes hasta materiales más dúctiles y tenaces.

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas de los biopolímeros de zeína y dextrano.

| Material | Resistencia a tracción (MPa) | Alargamiento a la rotura (%) | Resiliencia ($kJ/m^2$) | Dureza Shore D |
|---|---|---|---|---|
| Zeina | 8.0 | 81.5 | 8.1 | 40.9 |
| Zeina-2.5Dex | 14.0 | 13.7 | 2.5 | 52.0 |
| Zeina-5Dex | 9.5 | 27.6 | 2.0 | 51.3 |
| Zeina-10Dex | 6.6 | 65.8 | 3.4 | 53.7 |
| Zeina-20Dex | 4.1 | 82.6 | NR* | 42.4 |

*NR: No rotura

### Propiedades termomecánicas

El comportamiento termomecánico de las mezclas zeína/dextrano plastificadas con DEG se evaluó mediante análisis dinámico-mecánico-térmico (DMTA), analizando la evolución del módulo de almacenamiento y del factor de amortiguamiento, tal y como se muestra en la **Figura 1**. En general, todas las formulaciones presentaron un elevado módulo de almacenamiento a bajas temperaturas (3400-3600 MPa), asociado al estado rígido del material. Sin embargo, la muestra Zeína-20Dex mostró valores claramente inferiores en todo el intervalo inicial de temperatura (1400 MPa), lo que indica una mayor movilidad molecular y un comportamiento más flexible.

Al aumentar la temperatura, el módulo de almacenamiento disminuyó progresivamente hasta producirse una caída más acusada alrededor de la zona de transición vítrea. Este descenso es indicativo del paso de un comportamiento rígido a un comportamiento gomoso, asociado a un aumento en la movilidad de la parte amorfa de las cadenas poliméricas. En este sentido, las formulaciones con mayor contenido de dextrano, especialmente Zeína-20Dex, presentaron una menor rigidez, en concordancia con los resultados mecánicos previamente descritos.

En las curvas de tan $\delta$ se observaron dos transiciones principales. La primera, de menor intensidad, aparece en torno a -55/-65 °C y se asocia a una relajación secundaria de las cadenas poliméricas. Esta transición se desplazó ligeramente hacia temperaturas más bajas con el aumento del contenido de dextrano, lo que sugiere un incremento de la movilidad molecular. La segunda transición, más intensa, se localizó alrededor de 40-42 °C y puede atribuirse a la transición vítrea principal de las mezclas. Esta transición no sufre una gran variación entre mezclas, aunque el dextrano sí parece aumentar la flexibilidad de la zeína a medida que se aumenta su contenido.

En conjunto, los resultados de DMTA confirman que el dextrano permite modificar la respuesta termomecánica de la zeína plastificada con DEG, reduciendo la rigidez y aumentando la movilidad de las cadenas a altos contenidos de polisacárido.

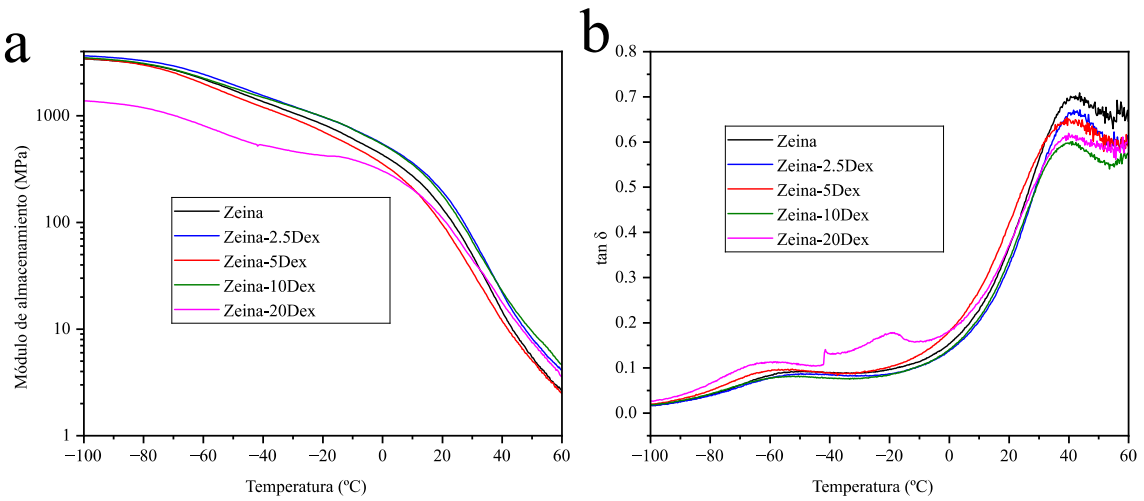



**Figura 1.** Evolución del módulo de almacenamiento (a) y del coeficiente de amortiguamiento (b) tan δ con la temperatura.

## Biodegradabilidad

La biodegradabilidad de las mezclas se evaluó mediante el ensayo de desintegración en condiciones controladas de compostaje, siguiendo la evolución de la pérdida de masa durante 7 semanas. Como se observa en la **Figura 2**, todos los materiales desarrollados superaron el 90% de desintegración, valor indicado mediante la línea discontinua, y alcanzaron prácticamente la desintegración completa al final del ensayo.

La zeína plastificada con DEG presentó una desintegración progresiva, alcanzando valores cercanos al 90% entre las semanas 6 y 7. La incorporación de dextrano aceleró este proceso, especialmente en las formulaciones con mayor contenido de polisacárido. En particular, la muestra Zeína-20Dex mostró la cinética de desintegración más rápida, superando el 90% de pérdida de masa alrededor de la quinta semana y alcanzando valores próximos al 100% antes que el resto de formulaciones.

Este comportamiento puede relacionarse con el carácter hidrofílico del dextrano, que favorece la absorción de humedad y facilita la fragmentación del material durante el compostaje. Como consecuencia, las cadenas poliméricas pueden ser atacadas con mayor facilidad por los microorganismos presentes en el medio. En conjunto, estos resultados confirman que las mezclas zeína/dextrano plastificadas con DEG presentan una elevada capacidad de desintegración en compost, lo que refuerza su interés como materiales biodegradables para aplicaciones de envase sostenible.

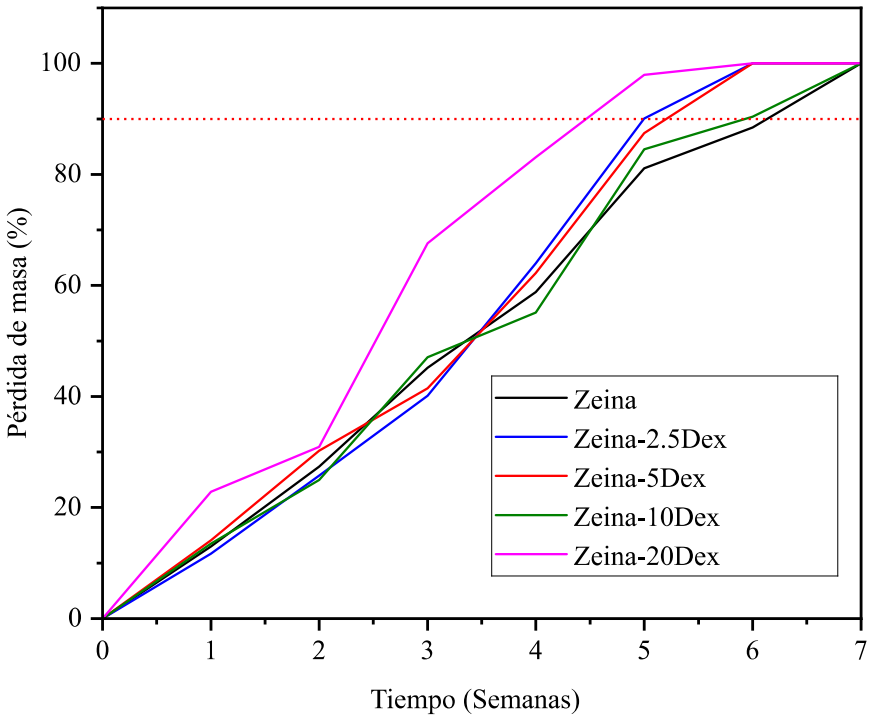



**Figura 2.** Evolución de la pérdida de masa de los biopolímeros zeína/dextrano en condiciones de compost.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron con éxito mezclas termoplásticas de zeína/dextrano plastificadas con DEG mediante extrusión e inyección, demostrando la viabilidad de procesar estos biopolímeros mediante tecnologías convencionales. La incorporación de dextrano permitió modular el comportamiento mecánico de la zeína, pasando de formulaciones más rígidas y resistentes a bajos contenidos de dextrano a materiales más dúctiles y tenaces cuando se incorporó un 20% de polisacárido.

El análisis DMTA confirmó esta tendencia, mostrando una reducción de la rigidez y un aumento de la movilidad molecular en las formulaciones con mayor contenido de dextrano. Además, todos los materiales presentaron una elevada capacidad de desintegración en condiciones de compostaje, superando el 90% de pérdida de masa y alcanzando prácticamente la desintegración completa en 7 semanas. En conjunto, estos resultados confirman el potencial de las mezclas zeína/dextrano/DEG como materiales biodegradables y procesables para aplicaciones de envase sostenible.

## REFERENCIAS

[1] Díaz-Montes. (2021). "Dextran: sources, structures, and properties". *Polysaccharides, v.2*, n. 3, pp. 554-565. https://doi.org/10.3390/polysaccharides2030033

[2] Llinares-Verdu;Gomez-Caturla;Peltzer;Fenollar;Balart. (2025). "Development of intelligent halochromic packaging films based on zein and pH-sensitive enocyanins for

evaluating the fish freshness". *Industrial Crops and Products, v.230*, n., pp. 121149. 10.1016/j.indcrop.2025.121149

[3] Patel;Hansson;Pitkanen;Geng;Oksman. (2022). "Biopolymer blends of poly (lactic acid) and poly (hydroxybutyrate) and their functionalization with glycerol triacetate and chitin nanocrystals for food packaging applications". *ACS Applied Polymer Materials, v.4*, n. 9, pp. 6592-6601. https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00967

[4] Rojas-Lema;Gómez-Caturla;Balart;Arrieta;Garcia-Sanoguera. (2024). "Development and characterization of thermoplastic zein biopolymers plasticized with glycerol suitable for injection molding". *Industrial Crops and Products, v.218*, n., pp. 119035. 10.1016/j.indcrop.2024.119035

[5] Wu;Wu;Hu. (2024). "Recent advances of proteins, polysaccharides and lipids-based edible films/coatings for food packaging applications: a review". *Food Biophysics, v.19*, n. 1, pp. 29-45. 10.1007/s11483-023-09794-7

# Datos abiertos procedentes de la agricultura familiar y comunitaria: los patios productivos AGROHUB

**Ferrer-Sapena, Antonia[(1)], Fernández de Córdoba, Pedro[(1)], Peset, Fernanda[(1)*], Martínez Lengua, Antonio[(2)]**

*(1) IUMPA, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. anfersa@upv.es; pfernandez@mat.upv.es; mpesetm@upv.es*
*(2) Universidad Sergio Arboleda. Cl. 74 #14-14, Bogotá, Colombia. antonio.martinezl@usa.edu.co*

## RESUMEN

La agricultura familiar y comunitaria genera datos de valor para la toma de decisiones sostenibles, pero su gestión y apertura plantean retos específicos. Este trabajo analiza el proyecto AgroHub Hortícola, que implementa herramientas metodológicas y tecnológicas (sensores) en patios productivos de comunidades rurales con limitada conectividad. A partir de los datos, se exploran las opciones para su publicación en abierto, evaluando plataformas científicas generalistas como Zenodo frente a sistemas como CKAN. Compara ventajas e inconvenientes, con especial atención a criterios de calidad de datos según la norma ISO 25012 y los principios FAIR. Concluye que CKAN ofrece mayor control, alimentación automática en tiempo real y mayor potencial de reutilización en el ecosistema productivo, aunque debe mitigar su menor visibilidad científica.

**Palabras clave:** datos abiertos, agricultura comunitaria, AgroHub, sensores, CKAN, FAIR, ISO 25012, gobernanza participativa.

## INTRODUCCIÓN

La agricultura familiar y comunitaria desempeña un papel fundamental en la seguridad alimentaria de numerosas comunidades rurales, especialmente en países en desarrollo. Sin embargo, los modelos de gestión de este tipo de agricultura adolecen históricamente de una limitada integración tecnológica, lo que dificulta la planificación eficiente, la gobernanza participativa y la toma de decisiones basadas en evidencias.

El proyecto AgroHub Hortícola surge como respuesta a esta brecha, con el objetivo de implementar herramientas metodológicas y tecnológicas para revelar y fortalecer modelos de agricultura campesina, indígena, familiar y comunitaria. La pieza central del proyecto son los "patios productivos": espacios agrícolas comunitarios equipados con sensores de monitorización que recogen datos de variables agroclimáticas de forma continua.

La generación sistemática de datos de sensores abre una oportunidad para la toma de decisiones, pero también para la apertura de datos y la interoperabilidad de la información con el objetivo de reutilizar la información [1]. Este trabajo plantea preguntas específicas sobre cómo gestionar esa apertura garantizando la calidad, la trazabilidad y la reutilización de la información generada.

## OBJETIVOS

Los objetivos de esta comunicación son describir el contexto tecnológico y social del proyecto AgroHub Hortícola, así como los datos que genera; evaluar comparativamente las plataformas científicas generalistas y el sistema CKAN en términos de calidad, accesibilidad y reutilización para la publicación de datos procedentes de sensores agrícolas; y proponer un marco de referencia para la gestión de datos abiertos en proyectos de agricultura comunitaria, basado en los principios FAIR y en la norma ISO 25012.

## RESULTADOS

### El proyecto AgroHub y sus patios productivos

El proyecto AgroHub Hortícola implementa patios productivos automatizados en comunidades rurales con escasa conectividad, combinando saberes ancestrales e innovación tecnológica. Los sensores instalados en las parcelas generan datos continuos sobre temperatura del aire, humedad relativa y del suelo, conductividad eléctrica, radiación solar y estado operativo de los dispositivos, entre otras variables [2].

Estos datos permiten una monitorización continua de los cultivos, mejoran la productividad al predecir y alertar sobre situaciones recurrentes, reducen los riesgos climáticos anticipando momentos críticos y facilitan el control comunitario poniendo herramientas tecnológicas avanzadas al alcance de las propias comunidades. El proyecto afronta además retos de naturaleza dual: infraestructurales (zonas de difícil acceso y limitada conectividad) y sociales (integración de saberes ancestrales y ciencia ciudadana adaptada a los territorios).

### Opciones para la publicación como datos abiertos

Desde el punto de vista legal, los datos obtenidos de sensores sin mayor tratamiento no pueden ser protegidos bajo la ley de propiedad intelectual, lo que facilita su apertura. Se han identificado dos grandes opciones tecnológicas para su publicación, cuyas características se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Análisis comparativo de las opciones de publicación. Elaboración propia.

| Factores | Opción A: Plataformas científicas | Opción B: CKAN sector público |
|---|---|---|
| Encontrabilidad científica | Alta (OAI-PMH, índices) | Baja (requiere estrategia) |
| Reutilización productiva | Limitada | Alta (sector público, empresas) |
| Actualización de datos | Manual / puntual | Automática / tiempo real |
| Control de la herramienta | Dependiente de la plataforma | Total (instalación local) |
| Coste de implantación | Bajo (registro gratuito) | Mayor (instalación + mantenimiento) |
| Curva de aprendizaje | Mínima | Media-alta |

La Opción A consiste en publicar los datos en plataformas científicas generalistas como Zenodo, Dataverse o Figshare, que ofrecen encontrabilidad en el ámbito de la ciencia y redifusión mediante servicios OAI-PMH, con una curva de aprendizaje mínima. Sus principales inconvenientes son la reutilización limitada, la gestión restringida a la oferta

de cada plataforma y la necesidad de ingesta manual, lo que genera un riesgo de desactualización progresiva.

La Opción B plantea publicar los datos en portales de datos abiertos mediante CKAN, un sistema opensource ampliamente aceptado, que permite alimentación automática desde los sensores en tiempo real y ofrece control total de la herramienta. Sus inconvenientes son el mayor coste de instalación y mantenimiento y el riesgo de menor visibilidad en el ámbito científico. Para mitigarlo, se proponen tres acciones: establecer convenios con portales gubernamentales; citar explícitamente el repositorio en las publicaciones científicas; y coalojar datos de otros proyectos para amortizar la inversión.

### Marco de calidad: ISO 25012 aplicado a AgroHub

La calidad de los datos se articula en torno a 17 criterios agrupados en cuatro áreas, derivados de la norma ISO 25012 y adoptados por el portal de datos abiertos del gobierno colombiano [4], contexto geográfico de implementación del proyecto. La Tabla 2 muestra la aplicación práctica de estos criterios en el repositorio AgroHub.

**Tabla 2**. Criterios ISO 25012 y su aplicación en el repositorio AgroHub. Elaboración propia a partir de ISO/IEC 25012 y Guía de calidad datos.gob.es.

| Área | Criterios ISO 25012 | Medidas en AGROHUB |
|---|---|---|
| Calidad del contenido | Exactitud, Completitud, Consistencia, Precisión, Unicidad | Validación de rangos físicos; marcado sistemático de nulos como NA; identificadores únicos por sensor y parcela; datos sin agregar al máximo nivel de desagregación. |
| Gestión y gobernanza | Trazabilidad, Credibilidad, Relevancia | Historial de transformaciones documentado; metadatos con responsable del dataset y contacto; selección de variables de alta demanda para la comunidad. |
| Accesibilidad técnica | Actualidad, Conformidad, Portabilidad, Comprensibilidad | Actualización horaria automática; UTF-8; separador (;) en CSV; nombres de campo en camelCase; diccionario de datos publicado junto al dataset. |
| Rendimiento | Eficiencia, Disponibilidad | Paginación en API; monitorización de uptime; copias de seguridad periódicas para recuperabilidad. |

### Los principios FAIR en el contexto de AgroHub

Complementariamente a los criterios ISO, los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) [5] orientan la publicación de los datos científicos del proyecto hacia estándares que priorizan la capacidad de los sistemas informáticos para gestionarlos con intervención humana mínima. La Tabla 3 muestra cómo se implementa cada principio en AgroHub.

**Tabla 3.** Implementación de los principios FAIR en AgroHub. Elaboración propia a partir de Wilkinson et al. (2016) y GO FAIR (https://www.go-fair.org).

| Principio | Aplicación en AgroHub |
|---|---|
| Findable | Identificadores persistentes por parcela y sensor; metadatos completos en CKAN; indexación en el catálogo nacional colombiano datos.gov.co. |
| Accessible | Descarga libre en CSV y JSON sin registro previo; API REST con paginación; protocolo HTTP estándar abierto. |
| Interoperable | Vocabularios controlados (DCAT-AP, VocBench); fechas en ISO 8601; coordenadas en grados decimales (WGS84); formatos RDF disponibles. |
| Reusable | Licencia CC-BY 4.0; diccionario de datos alineado con ISO 25012; trazabilidad de transformaciones documentada; descripción de limitaciones conocidas. |

### El diccionario de datos y la ficha CKAN

Un elemento central en la organización y calidad de los datasets es el diccionario de datos [6], entendido como un repositorio estructurado de metadatos que documenta técnicamente cada campo. Para los datos agroclimáticos de los sensores, el diccionario incluye campos como parcela_id, sensor_id, fecha_hora (ISO 8601), temperatura_aire, humedad_relativa, humedad_suelo, conductividad_suelo, radiacion_solar, estado_sensor y calidad_dato.

La ficha de dataset en CKAN incluye metadatos generales (cobertura geográfica; temporal; frecuencia de actualización; formatos: CSV y JSON; licencia: CC-BY 4.0), varios formatos de distribución e información sobre calidad de los datos y limitaciones (como pérdidas de datos o retrasos puntuales en la transmisión IoT).

Entre las reglas de calidad específicas para los formatos adoptados se destacan: uso del punto y coma (;); codificación UTF-8; nombres de campo en camelCase; fechas en formato AAAA-MM-DDThh:mm:ss y paginación en la API REST mediante los parámetros offset y limit.

El diccionario de datos se distingue del glosario de negocio en que se focaliza en aspectos técnicos de almacenamiento y estructura, y no solo en la definición conceptual de los términos. Su publicación como distribución independiente del dataset en CKAN (vinculada mediante la propiedad dct:conformsTo del estándar DCAT-AP) garantiza que los reutilizadores dispongan de la documentación técnica necesaria para interpretar, integrar y aplicar los datos correctamente.

### Reglas de calidad por formato y vocabularios de referencia

La publicación de datos de sensores agroclimáticos implica decisiones técnicas precisas sobre los formatos de distribución. Para los archivos CSV, además del uso del punto y coma como delimitador, se establece que cada fichero contendrá una única tabla, se evitará incluir información adicional (títulos, líneas en blanco, explicaciones) y todos los valores faltantes se identificarán de forma consistente como NA, distinguiendo siempre entre datos nulos, desconocidos y cero. Para los archivos JSON, los campos se organizarán en estructuras jerárquicas que agrupen la información de forma semántica y los valores numéricos se codificarán con el tipo de dato number, sin unidades de medida embebidas en el campo.

En cuanto a los vocabularios, la estandarización de los valores de las variables se basa en el sistema VocBench de la Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, compatibilizado con el estándar DCAT [3]. Las coordenadas geográficas siguen las especificaciones del Open Geospatial Consortium (WGS84, grados decimales), y las fechas se codifican en ISO 8601. Esta estandarización es especialmente relevante para facilitar la futura integración del repositorio AgroHub con el portal nacional de datos abiertos de Colombia datos.gov.co, que utiliza CKAN como plataforma de gestión, y con portales internacionales del sector agrícola como AGRIS de la FAO.

La adopción de vocabularios controlados permite además activar el potencial de los datos enlazados: cuando los valores se codifican mediante URI de vocabularios reconocidos, pueden desreferenciarse para obtener representaciones en múltiples idiomas, lo que facilita la comparación internacional de datos de agricultura familiar procedentes de distintos países y regiones, y favorece el análisis de tendencias en el contexto del cambio climático y la seguridad alimentaria global.

### Retos de implementación y lecciones aprendidas

La implementación del repositorio de datos abiertos en el contexto AgroHub ha puesto de manifiesto retos prácticos que van más allá de la elección tecnológica. En primer lugar, la limitada conectividad de las zonas de actuación obliga a diseñar mecanismos de almacenamiento local con sincronización diferida, de modo que los datos de los sensores se acumulan en dispositivos locales y se transmiten al repositorio CKAN cuando la conectividad lo permite, sin perder la integridad del registro temporal.

En segundo lugar, la integración de los saberes ancestrales de las comunidades en la estructura de metadatos representa un reto conceptual singular: variables como el estado fenológico de los cultivos según el conocimiento campesino, las prácticas de manejo tradicional o los eventos climáticos localmente significativos no tienen equivalente directo en los vocabularios controlados estándar. Para abordar este reto, se está trabajando en la incorporación de etiquetas en lenguas nativas y en la creación de un tesauro local complementario al vocabulario de referencia VocBench.

En tercer lugar, la sostenibilidad del repositorio a largo plazo requiere formación de las comunidades en la gestión básica de datos, así como el establecimiento de acuerdos de gobernanza que determinen quién puede publicar, modificar o retirar conjuntos de datos, en consonancia con los principios de gobernanza participativa e inclusiva que definen el modelo AgroHub.

Estas experiencias son coherentes con las que documentan otros proyectos internacionales de datos abiertos en contextos de agricultura familiar, como los promovidos por CGIAR o FAO, que señalan reiteradamente que los obstáculos técnicos son habitualmente menos determinantes que los organizativos, culturales y de capacitación. La apertura de datos no es un acto puntual sino un proceso continuo que requiere compromiso institucional, recursos sostenidos y una comunidad de usuarios activa.

## CONCLUSIONES

La apertura de datos procedentes de sensores instalados en patios productivos de agricultura familiar y comunitaria representa una oportunidad valiosa para generar conocimiento científico y apoyar la toma de decisiones en contextos rurales vulnerables. Las conclusiones principales de este trabajo son las siguientes:

- La solución CKAN ofrece ventajas decisivas frente a las plataformas científicas generalistas para este contexto: alimentación automática en tiempo real, control total sobre la herramienta y mayor potencial de reutilización en el ecosistema productivo local y nacional.
- La calidad de los datos publicados requiere adoptar un marco integrado que combine los 17 criterios de la norma ISO 25012 con los principios FAIR, garantizando la encontrabilidad, accesibilidad, interoperabilidad y reutilización tanto por humanos como por sistemas informáticos.
- La elaboración de un diccionario de datos alineado con CKAN y con la norma ISO 25012, junto con la definición de reglas de calidad específicas para formatos CSV, JSON y RDF, constituye un requisito previo para una apertura de datos efectiva.

- Las estrategias para mitigar la menor visibilidad científica de CKAN (convenios gubernamentales, cita en publicaciones, coalojamiento de proyectos afines) son necesarias pero viables y no representan un obstáculo insalvable.

En conjunto, este trabajo contribuye a la discusión sobre cómo los proyectos de innovación social y tecnológica en el ámbito de la agricultura comunitaria pueden adoptar estrategias rigurosas de apertura de datos que maximicen su impacto científico, social y económico, siendo replicables en otros contextos de agricultura familiar con características similares.

Como línea de trabajo futura, se prevé el análisis de la interoperabilidad entre el repositorio CKAN del proyecto y el portal nacional de datos abiertos de Colombia datos.gov.co, así como la exploración de formatos de datos enlazados (RDF/JSON-LD) que permitan enriquecer los datos de sensores con vocabularios geoespaciales y agronómicos de referencia internacional.

Los retos de implementación en contextos de agricultura comunitaria van más allá de la elección tecnológica: la conectividad limitada, la integración de saberes ancestrales en los vocabularios controlados y la sostenibilidad de la gobernanza participativa son dimensiones igualmente críticas para el éxito del repositorio a largo plazo.

Las estrategias propuestas son transferibles a otros contextos de agricultura familiar en América Latina y otras regiones donde la agricultura campesina contando con que la tecnología está desarrollada (repositorio y panel de control) y los sensores son asequibles.

## AGRADECIMIENTOS

Proyecto BPIN 2024000100047: Implementación de herramientas metodológicas y tecnológicas que permitan fortalecer la integración de procesos en los modelos de agricultura campesina indígena familiar y comunitaria en el departamento del Magdalena.

## REFERENCIAS

[1] Ferrer-Sapena, A.; Peset, F. (2025). "Datos abiertos procedentes de la agricultura familiar y comunitaria: los patios productivos AGROHUB". En: I Jornada Internacional Open Future Lab: Diseño estratégico y pensamiento prospectivo. Universidad de Granada, 4 dic. 2025. https://huertafutura.com/congreso/

[2] Ferrer-Sapena, A.; Peset, F. (2026). Plan de apertura de datos. Proyecto AgroHub. Informe interno I5.

[3] Oficina de Publicaciones de la UE (2021). Data Quality Guidelines. https://doi.org/10.2830/879764

[4] MinTIC Colombia (2022). Guía de calidad e interoperabilidad de datos abiertos.

[5] Wilkinson, M.D. et al. (2016). "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship". *Scientific Data*, v. 3, p.p. 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

[6] Datos.gob.es (2025). Guía práctica para la mejora de la calidad de datos abiertos. Ministerio para la Transformación Digital, España.

# Valorización de PET multicapa reciclado mediante incorporación de LDPE reciclado

**Unamuno Garay, Aritz*(1), Galera Perez , Fernando(1), Ibáñez-García, Ana(2) Martínez-García, Asunción(2) ,Samper, Maria-Dolores(1)**

*(1) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoy (Alicante), aunagar@upv.edu.es*
*(2) AIJU Instituto Tecnológico de Producto Infantil y Ocio, 03440 Ibi, España*

## RESUMEN

El interés por la sostenibilidad y la economía circular ha impulsado la valorización de residuos plásticos complejos, como el PET multicapa (mPET), que presenta baja compatibilidad entre fases poliméricas y limitaciones de procesabilidad.

En este trabajo se evaluó la compatibilización de mPET reciclado mediante la incorporación de LDPE reciclado (LDPE-R) y LDPE virgen, usando EMAGMA (4 phr) como compatibilizante. Se analizaron propiedades mecánicas (tracción, flexión, impacto Izod) y térmicas (DSC). Los resultados mecánicos mostraron que el mPET incrementa la rigidez respecto al LDPE-R, alcanzando módulos de 333–417 MPa, aunque con baja ductilidad (1,6–3,0%). El LDPE virgen proporcionó el mejor equilibrio, con mayor módulo (526 MPa), resistencia (24,2 MPa) y mayor deformación (~5%). En flexión e impacto se observó la misma tendencia, destacando el LDPE virgen con mayor tenacidad (5,4 kJ/m²) y mejores propiedades globales. Los análisis DSC mostraron transiciones de fusión del LDPE entre 140–160 °C, más definidas en LDPE virgen. En conjunto, la incorporación de LDPE permite modular las propiedades del mPET, siendo el LDPE virgen el que ofrece mejor compatibilización y rendimiento global

AGRADECIMIENTOS: Esta investigación fue financiada por la Unión Europea (HORIZON-CL6-2023-CIRCBIO-02), a través del proyecto CIRCSYST (ID del acuerdo de subvención: 101135505).

**Palabras clave:** PET multicapa reciclado, LDPE reciclado, compatibilización, economía circular.

## INTRODUCCIÓN

El incremento del consumo de materiales plásticos multicapa en envases ha generado un importante desafío ambiental debido a la dificultad de reciclado de estas estructuras complejas. Entre ellos, el PET multicapa (mPET) destaca por sus buenas propiedades barrera y mecánicas, aunque su valorización se ve limitada por la baja compatibilidad entre fases poliméricas [1,2].

El interés por la sostenibilidad y la economía circular ha impulsado el desarrollo de estrategias para la valorización de residuos plásticos complejos, especialmente los procedentes de envases multicapa basados en PET [1,2]. En este contexto, la reutilización de estos residuos mediante compatibilización y la incorporación de poliolefinas recicladas, como el polietileno de baja densidad reciclado (LDPE-R), permite modular sus propiedades mecánicas y de procesabilidad. Sin embargo, la baja compatibilidad entre PET y LDPE provoca una débil adhesión interfacial y un deterioro de las propiedades finales del material [1].

Por ello, el presente trabajo aborda la valorización de residuos de mPET reciclado mediante la incorporación de LDPE reciclado y LDPE virgen, evaluando la influencia de la composición sobre las propiedades mecánicas y térmicas de las mezclas desarrolladas.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar la valorización de PET multicapa reciclado mediante la incorporación de LDPE reciclado y LDPE virgen, empleando EMAGMA como compatibilizante para mejorar la compatibilidad interfacial entre las fases poliméricas.

De manera específica, se plantearon los siguientes objetivos:

- Evaluar el efecto del contenido de LDPE reciclado sobre las propiedades mecánicas de las mezclas mPET/LDPE.
- Comparar el comportamiento de formulaciones preparadas con LDPE reciclado y LDPE virgen.
- Determinar la relación entre composición, rigidez y ductilidad mediante ensayos de tracción, flexión e impacto Izod.
- Estudiar el comportamiento térmico mediante análisis DSC.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

El presente estudio se centró en la valorización de PET multicapa reciclado (mPET) mediante la incorporación de polietileno de baja densidad reciclado (LDPE-R) y LDPE virgen, empleando un compatibilizante reactivo tipo copolímero poliolefínico funcionalizado con grupos epoxi (EMAGMA) con el objetivo de mejorar la interacción y compatibilidad interfacial entre ambas fases poliméricas. Para ello, se incorporó EMAGMA en una proporción constante de 4 phr en todas las formulaciones, favoreciendo una mejor adhesión entre fases, reduciendo la separación interfacial y promoviendo una distribución más homogénea de la fase poliolefínica dentro de la matriz de mPET. Las propiedades del LDPE reciclado utilizado en este trabajo se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades del LDPE-R reciclado suministrado por ACTECO.

| Propiedad | LDPE-R |
|---|---|
| MFI (g/10 min) at 250°C/10 kg | 35,41±0,32 |
| Densidad (g/cm³) | 0,916±0,002 |

### Preparación de las formulaciones

Las formulaciones se prepararon variando el contenido de LDPE reciclado entre 10, 20 y 30 % en peso, empleando además una formulación de referencia con 10 % de LDPE virgen. Las mezclas se procesaron mediante extrusión en una extrusora de doble husillo TEACH LINE COMPOUNDER ZK (25:24 L/D) y posteriormente se inyectaron en una DEMAG Ergotech 110-430h/310V para la obtención de probetas. La nomenclatura y composición de las formulaciones desarrolladas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Nomenclatura y composición de las formulaciones mPET/LDPE.

| Nomenclatura | Composición |
|---|---|
| mPET90/LDPEv10 | 90 % mPET + 10 % LDPE virgen |
| mPET90/LDPEr10-E | 90 % mPET ACTECO + 10 % LDPE reciclado + 4 phr EMAGMA |
| mPET80/LDPEr20-E | 80 % mPET ACTECO + 20 % LDPE reciclado + 4 phr EMAGMA |
| mPET70/LDPEr30-E | 70 % mPET ACTECO + 30 % LDPE reciclado + 4 phr EMAGMA |

### Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante ensayos de tracción, flexión e impacto Charpy. Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina Instron 6025 con célula de carga de 5 kN y electrónica Zwick, empleando una velocidad de 1 mm/min para determinar el módulo y 10 mm/min hasta rotura. En flexión se utilizó una velocidad de 2 mm/min. El ensayo de impacto se realizó con un equipo CEAST RESILIMPACTOR 5.5 equipado con un martillo de 5,5 J, ensayando las probetas entalladas sobre la cara estrecha. Estos ensayos permitieron analizar la influencia del contenido de LDPE sobre la rigidez, resistencia mecánica, ductilidad y absorción de energía.

### Caracterización térmica

El comportamiento térmico de las mezclas mPET/LDPE se analizó mediante DSC utilizando un equipo TA Instruments DSC 25 AutoD, en un intervalo de 0 a 300 ºC y con una rampa de calentamiento de 10 ºC/min.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de tracción

Los resultados de tracción muestran una clara influencia de la composición sobre las propiedades mecánicas (ver Tabla 3). La formulación de referencia, compuesta por 90 % de mPET y 10 % de LDPE virgen, presentó los mayores valores de módulo y resistencia máxima, alcanzando 526 ± 15 MPa y 24,2 ± 0,5 MPa, respectivamente, así como una elongación a rotura de 4,6 ± 0,2 %, evidenciando un comportamiento más rígido y resistente que las formulaciones con LDPE reciclado.

En las mezclas con LDPE-R y 4 phr de EMAGMA se observó una reducción del módulo y de la resistencia mecánica. La formulación con 10 % de LDPE-R presentó los valores más bajos, con 417 ± 30 MPa de módulo, 7,73 ± 0,854 MPa de tensión máxima y 1,6 ± 0,27 % de elongación. No obstante, al aumentar el contenido de LDPE reciclado hasta el 30 %, la ductilidad mejoró progresivamente, incrementándose la elongación a rotura de 1,6 % a 3,0 % y la resistencia máxima de 7,73 MPa a 11,0 MPa, mientras que el módulo disminuyó debido al carácter más flexible de la fase poliolefínica.

En conjunto, los resultados indican que el aumento de LDPE reciclado favorece un comportamiento más dúctil y menos rígido, mientras que el compatibilizante EMAGMA contribuye parcialmente a mejorar la compatibilidad entre fases

**Tabla 3.** Propiedades a tracción de formulaciones mPET/LDPE.

| Muestra | Módulo elástico (MPa) | Tensión máxima (MPa) | Elongación a rotura (%) |
|---|---|---|---|
| mPET90/LDPEv10 | 526±15,50 | 24,2±0,50 | 4,6±0,20 |
| mPET90/LDPEr10-E | 417±30,00 | 7,73±0,80 | 1,6±0,27 |
| mPET80/LDPEr20-E | 391±42,80 | 9,63±0,40 | 2,1±0,10 |
| mPET70/LDPEr30-E | 333±28,40 | 11,0±0,30 | 3,0±0,10 |

## Resultados de flexión

Las propiedades a flexión de las mezclas mPET/LDPE-R muestran una clara dependencia del contenido y naturaleza del LDPE utilizado (ver Tabla 4). En las formulaciones con LDPE-R reciclado, el incremento del contenido de LDPE provoca una disminución progresiva del módulo de flexión (MPa), debido al carácter más flexible de la fase poliolefínica respecto a la matriz rígida de mPET.El módulo de flexión (MPa) disminuye desde 1170 MPa para la formulación con 10% de LDPE-R hasta 830 MPa para la composición con 30% de LDPE-R.

Asimismo, la tensión máxima (MPa) presenta valores relativamente bajos, variando entre 23,8 y 26,7 MPa, lo que sugiere una compatibilidad interfacial limitada entre el mPET y el LDPE reciclado. Sin embargo, el incremento de la proporción de LDPE-R favorece una mejora progresiva de la ductilidad, aumentando el alargamiento a la rotura (%) desde 2,2% hasta 4,5%. En comparación, la formulación con LDPE virgen presenta un comportamiento mecánico más equilibrado. El sistema con 90% mPET y 10% LDPE virgen compatibilizado con EMAGMA alcanza un módulo de flexión (MPa) de 1150 MPa y una tensión máxima (MPa) de 40,2 MPa, valores significativamente superiores a los obtenidos con LDPE reciclado. Además, el alargamiento a la rotura alcanza 5,3%, indicando una mejora simultánea de resistencia mecánica y ductilidad.

Estos resultados evidencian que el uso de LDPE virgen favorece una mejor interacción entre fases y una estructura más homogénea, mientras que el LDPE reciclado introduce una mayor heterogeneidad estructural que afecta negativamente a las propiedades mecánicas.

**Tabla 4.** Propiedades a flexión de formulaciones mPET/LDPE

| Muestra | Módulo de flexión (MPa) | Tensión máxima (MPa) | Alargamiento a la rotura (%) |
|---|---|---|---|
| mPET90/LDPEv10 | 1130±30,10 | 39,4±1,11 | 5,3±0,15 |
| mPET90/LDPEr10-E | 1170±28,10 | 23,8±1,74 | 2,2±0,14 |
| mPET80/LDPEr20-E | 964±40,90 | 25,7±1,37 | 3,2±0,19 |
| mPET70/LDPEr30-E | 830±35,70 | 26,7±0,42 | 4,5±0,15 |

## Resultados de impacto Izod

Los resultados de impacto Izod (Tabla 5) muestran una clara dependencia del tipo de LDPE utilizado. En las formulaciones con LDPE reciclado, la resistencia al impacto aumenta ligeramente con el contenido de LDPE, pasando de 1,6 a 2,1 kJ/m², lo que

indica una mejora moderada en la absorción de energía asociada al aumento de la fase flexible.

Sin embargo, estos valores siguen siendo bajos, lo que sugiere una eficacia limitada del compatibilizante para mejorar la tenacidad del sistema. En cambio, la formulación con LDPE virgen presenta un valor significativamente superior (5,4 kJ/m²), indicando una mejor dispersión y una mayor eficacia en la transferencia de esfuerzos. En conjunto, el LDPE virgen mejora notablemente el comportamiento al impacto frente al LDPE reciclado.

**Tabla 5.** Propiedades a impacto de formulaciones mPET/LDPEropiedades del LDPE-R.

| Muestra | Resistencia al impacto Izod con entalla kJ/m²) |
|---|---|
| mPET90/LDPEv10 | 5,4 ± 1,60 |
| mPET90/LDPEr10-E | 1,6±0,12 |
| mPET80/LDPEr20-E | 1,7±0,14 |
| mPET70/LDPEr30-E | 2,1±0,34 |

## Resultados DSC

La Figura 1 muestra los termogramas DSC de las formulaciones evaluadas. En todos los casos se identifican eventos endotérmicos asociados a las fases poliméricas presentes en el sistema multicapa.

La formulación mPET90/LDPEv10 (Figura 1a) presenta dos eventos endotérmicos principales. El primero, localizado alrededor de 110–120 °C, se asocia a la fusión de las fracciones poliolefínicas presentes en el sistema, correspondientes tanto al LDPE añadido como a posibles capas de polietileno remanentes del mPET multicapa. El segundo evento, cercano a 250–260 °C, corresponde a la fusión de la fase PET.

En los termogramas de las figuras 1b, 1c y 1d se observa un desdoblamiento más evidente de la región de fusión a bajas temperaturas, dando lugar a múltiples picos endotérmicos. Este comportamiento sugiere la presencia de distintas poblaciones cristalinas de naturaleza poliolefínica, probablemente asociadas a diferencias en composición, historial térmico y grado de cristalinidad entre el LDPE reciclado añadido y las fracciones poliolefínicas originalmente presentes en el mPET multicapa.

En general, los resultados DSC evidencian que el uso de LDPE reciclado modifica ligeramente el comportamiento térmico del sistema, aunque sin alterar significativamente las características térmicas propias del LDPE.

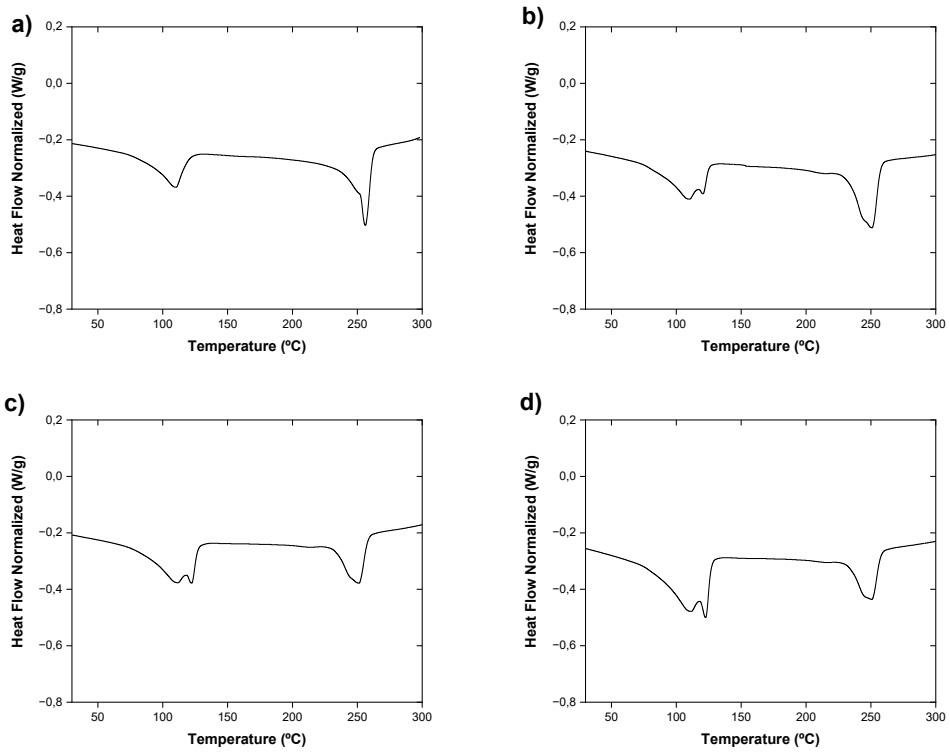



**Figura 1.** Termogramas DSC de las formulaciones evaluadas: (a) mPET90/LDPEv10 (b) mPET90/LDPEr10-E (c) mPET80/LDPEr20-E (d) mPET70/LDPEr30-E.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo ha evaluado la valorización de mPET reciclado mediante la incorporación de LDPE reciclado y LDPE virgen, utilizando EMAGMA como compatibilizante. Los resultados muestran que la formulación con LDPE virgen presenta el mejor comportamiento global en términos de rigidez, resistencia y ductilidad, así como mayor resistencia al impacto, debido a una mejor compatibilidad interfacial y mayor homogeneidad estructural. En cambio, las formulaciones con LDPE reciclado presentan menores propiedades mecánicas, aunque con un aumento progresivo de la ductilidad al incrementar su contenido. El compatibilizante EMAGMA mejora parcialmente la interacción entre fases, aunque su efecto es limitado en el sistema con LDPE reciclado. A nivel térmico, todas las formulaciones muestran comportamientos similares al LDPE, observándose mayor heterogeneidad en las mezclas con material reciclado. En conjunto, el LDPE virgen ofrece el mejor equilibrio de propiedades, mientras que el LDPE reciclado representa una alternativa viable dentro de la economía circular, aunque requiere una mayor optimización de la compatibilización.

## REFERENCIAS

[1] [Pinzón, L.; Saron, C. (2020). “Recyclability and redesign challenges in multilayer flexible food packaging—A review”. Polymers, v. 12, n. 4, p.p. 1–26. https://doi.org/10.3390/polym12040934

[2] Kaiser, K.; Schmid, M.; Schlummer, M. (2018). “Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review”. Recycling, v. 3, n. 1, p.p. 1. https://doi.org/10.3390/

# Efecto de la incorporación de PHA en el comportamiento del PLA

**Llidó Barragán, Alexandra *(1), Unamuno Garay, Aritz (1), López-Martínez, Juan (1) Pavón, Cristina (1),**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (Universitat Politècnica de València). Plaza Ferrándiz y Carbonell 03801 Alcoy, Alicante,*
*alllibar@epsa.upv.es *(1); aunagar@epsa.upv.es (1); jlopezm@mcm.upv.es (1); cripava1@epsa.upv.es (1)*

## RESUMEN

El presente trabajo estudia la modificación del ácido poliláctico (PLA) mediante la incorporación de poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV), con el objetivo de analizar los cambios inducidos en su comportamiento térmico, mecánico y estructural.

Se prepararon mezclas con diferentes contenidos de PHBV (0–30 % en peso) mediante procesamiento en fundido y posterior conformado por microinyección. La caracterización se realizó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), ensayos mecánicos de tracción e impacto y espectroscopía FTIR.

Los resultados térmicos muestran un aumento del grado de cristalinidad del PLA con la incorporación de PHBV, lo que indica su papel como promotor de cristalización. En el comportamiento mecánico se observa una tendencia general a la reducción de la resistencia y la rigidez al aumentar el contenido de PHBV, con una ligera mejora en la ductilidad (hasta ~13 %). El análisis FTIR no evidencia la formación de nuevos enlaces químicos, lo que indica que la compatibilidad entre ambos polímeros es principalmente física.

En conjunto, el PHBV permite ajustar el comportamiento del PLA, aumentando su cristalinidad pero reduciendo su rigidez. La formulación con 10 % de PHBV presenta el mejor equilibrio global entre resistencia, rigidez y ductilidad, mostrando potencial para aplicaciones en ingeniería de tejidos y materiales biodegradables.

**Palabras clave:** PLA, PHBV, biopolímeros, propiedades mecánicas, DSC, FTIR.

## INTRODUCCIÓN

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero ampliamente utilizado debido a su origen renovable, biodegradabilidad y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, su fragilidad y baja resistencia al impacto limitan su aplicación en sectores que requieren mayor ductilidad.

Para mejorar estas propiedades, se han desarrollado diferentes estrategias de modificación, siendo la más común la mezcla con polímeros flexibles. En este sentido, diversos estudios han demostrado que la incorporación de polímeros como PCL, TPU, PBS o PBAT mejora la tenacidad del PLA al aumentar su capacidad de deformación antes de la rotura. Dentro de este grupo de materiales, los polihidroxialcanoatos (PHA), y en particular el poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV), tiene un carácter totalmente biodegradable y su mejor comportamiento mecánico en comparación con el PLA. Su incorporación permite modificar la respuesta del material, especialmente en términos de ductilidad y procesabilidad [1].

En este contexto, el trabajo evalúa el efecto de la incorporación de PHBV en PLA, analizando sus propiedades térmicas, mecánicas y estructurales y su influencia en el comportamiento del material. Además, estos sistemas presentan interés en el desarrollo de materiales biodegradables para ingeniería de tejidos [2].

## MÉTODOS EXPERIMENTALES

### Materiales y preparación de muestras

Se utilizó PLA de grado comercial Ingeo Biopolymer 3251D (NatureWorks), con una densidad de 1,24 g/cm³, como matriz polimérica. A esta matriz se incorporó PHBV (PHI 002, NaturePlast, Francia) con una densidad de 1,25 g/cm³ y un índice de fluidez (MFI) de 10–30 g/10 min (a 210 °C bajo una carga de 2,6 kg).

Los materiales se secaron a 50 °C durante 24 h. A continuación, se prepararon mezclas PLA/PHBV (0–30 % en peso), cuyas formulaciones se muestran en la Tabla 1.

Las mezclas se procesaron mediante extrusión en una máquina Xplore MC 15HT a 180 °C y 100 rpm durante 1 min. Posteriormente, se obtuvieron probetas mediante microinyección (Xplore IM12) a 180 °C, con molde a 40 °C y presión escalonada de 10-9-9 bar.

**Tabla 1.** Composiciones según el contenido en peso (% en peso) de PLA y PHBV.

| Muestra | PLA (% en peso) | PHBV (% en peso) |
|---|---|---|
| PLA | 100 | 0 |
| PLA-10PHBV | 90 | 10 |
| PLA-20PHBV | 80 | 20 |
| PLA-30PHBV | 70 | 30 |

### Caracterización térmica

Las propiedades térmicas de las muestras se evaluaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). El análisis se realizó en un equipo DSC25 Discovery Series (TA Instruments, New Castle, DE, EE. UU.). Las muestras fueron previamente secadas y colocadas en cápsulas herméticas, utilizando nitrógeno como gas de purga a 50 mL/min para minimizar la influencia de la humedad. Se emplearon muestras de 5–9 mg.

El protocolo térmico consistió en un primer calentamiento desde 30 hasta 200 °C a 10 °C/min, seguido de un enfriamiento hasta 30 °C y un segundo calentamiento hasta 200 °C bajo las mismas condiciones. Este ciclo permite eliminar la historia térmica del material y garantizar la reproducibilidad de las transiciones térmicas. El análisis se realizó a partir del segundo calentamiento.

El grado de cristalinidad ($X_c$) se calculó a partir de las entalpías de fusión ($\Delta H_m$) y cristalización en frío ($\Delta H_{cc}$), la entalpía del polímero completamente cristalino ($\Delta H_m^o$) y la fracción en peso (w).

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0 \cdot w} \times 100$$

### Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas de las muestras se evaluaron utilizando una máquina de ensayo universal ELIB 30 (SAE Ibertest, Madrid, España), equipada con una célula de carga de 5 kN. Los ensayos se realizaron según la norma ISO 527-1 (Organización Internacional de Normalización, 2019) a una velocidad de 5 mm/min, utilizando probetas tipo 1BA conforme a la norma ISO 527-2 (Organización Internacional de Normalización, 2025), obteniendo la resistencia a la tracción (MPa), la elongación a la rotura (%) y el módulo de Young (MPa). La resistencia al impacto se evaluó según la norma ISO 179 (Organización Internacional de Normalización, 2023) utilizando un péndulo Charpy de 6 J de Metrotec S.A. (San Sebastián, España), y la dureza Shore D conforme a la norma ISO 868 (Organización Internacional de Normalización, 2003) utilizando un durómetro JBA 673-D de J. Bot S.A. (Barcelona, España). Todos los resultados corresponden al promedio de cinco probetas por composición, ensayadas a temperatura ambiente.

### Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) se realizó utilizando un espectrómetro PerkinElmer Spectrum Two FT-IR (PerkinElmer, MA, EE. UU.), equipado con un accesorio ATR universal, con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en el PLA, el PHBV y sus mezclas. Los espectros se registraron en el rango de 4000 a 600 $cm^{-1}$, con una resolución de 4 $cm^{-1}$ y un intervalo de 1 $cm^{-1}$.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades térmicas

Las interacciones entre componentes se evalúan mediante la temperatura de transición vítrea ($T_g$), la temperatura de cristalización en frío ($T_{cc}$), la temperatura de fusión ($T_m$) y el grado de cristalinidad ($X_c$). La Tabla 2 presenta los resultados de DSC.

**Tabla 2.** Propiedades térmicas de la mezcla de PLA/PHBV.

| Muestra | Tg PLA (°C) | Tm PLA (°C) | Tcc PLA (ºC) | $AH_{cc}$ (J/g) | $AH_m$ (J/g) | Xc (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PLA | 63,60 | 168,74 | 104,92 | 30,48 | 38,75 | 8,90 |
| PLA-10PHBV | 62,70 | 169,06 | 102,22 | 25,45 | 41,04 | 18,60 |
| PLA-20PHBV | 62,20 | 169,36 | 101,93 | 22,57 | 35,89 | 17,90 |
| PLA-30PHBV | 61,37 | 168,65 | 100,62 | 19,13 | 45,01 | 39,80 |
| PHBV | -5,00 | 171,6 | 125,1 | - | 102,3 | 70,1 |

El análisis DSC de PLA y sus mezclas con PHBV mostró cambios en su comportamiento térmico (Figura 1). La $T_g$ del PLA fue de 63,6 °C, mientras que la del PHBV (-5 °C) no se observó experimentalmente, en concordancia con la literatura por su baja intensidad y fuera del rango de medida [3].

En las mezclas PLA/PHBV se observó una ligera disminución de la $T_g$ del PLA al aumentar el contenido de PHBV, pasando de 63,6 °C en el PLA puro a ~61–63 °C en las formulaciones, lo que indica cambios leves en la movilidad de las cadenas poliméricas.

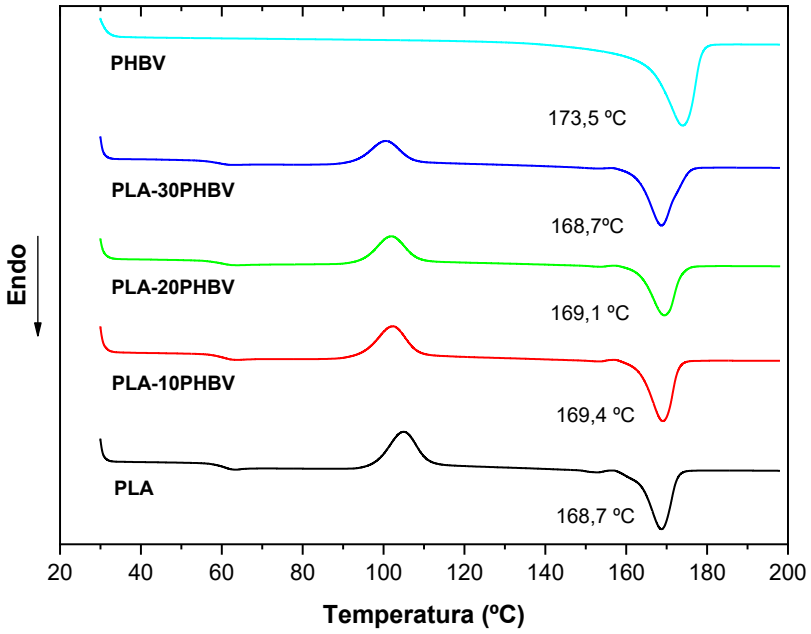



**Figura 1.** Curvas DSC de PLA, PHBV y mezclas PLA/PHBV con diferentes composiciones.

La temperatura de fusión del PLA se mantuvo alrededor de 168–169 °C, con ligeras variaciones al aumentar el contenido de PHBV. En el caso del PHBV, la temperatura de fusión se situó en torno a 173,5 °C. La temperatura de cristalización en frío disminuyó al incrementar la fracción de PHBV, pasando de 104,9 °C en el PLA puro a 100,6 °C en PLA-30PHBV, lo que indica que el PHBV facilita la cristalización del PLA al actuar como agente de nucleación heterogénea [4]. El grado de cristalinidad aumentó con el contenido de PHBV, desde 8,9 % en PLA hasta 39,8 % en PLA-30PHBV, confirmando la mayor organización cristalina inducida por PHBV en la mezcla.

En general, el PHBV promueve la cristalización del PLA y modifica sus propiedades térmicas, sin afectar significativamente su fusión.

## Propiedades mecánicas

Los resultados mecánicos (Tabla 3) muestran que la incorporación de PHBV reduce progresivamente la resistencia a tracción del PLA.

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas de las mezclas de PLA/PHBV.

| Muestra | $\tau_{max}$ (MPa) | $\varepsilon_b$ (%) | E (MPa) | Dureza Shore D | Resistencia al impacto (kJ/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| PLA | 76,4 ± 1,1 | 11,4 ± 0,4 | 991,0 ± 73,3 | 82,5 ± 1,3 | 36,4 ± 2,7 |
| PLA-10PHBV | 68,9 ± 1,5 | 12,5 ± 0,4 | 696,6 ± 66,9 | 83,0 ± 1,4 | 34,6 ± 2,3 |
| PLA-20PHBV | 63,9 ± 1,9 | 12,1 ± 1,1 | 754,0 ± 109,4 | 81,4 ± 1,3 | 33,1 ± 1,8 |
| PLA-30PHBV | 62,4 ± 1,4 | 13,5 ± 1,2 | 746,6 ± 98,7 | 75,0 ± 0,8 | 30,7 ± 1,7 |

La resistencia máxima a tracción ($\tau_{max}$) disminuye desde 76,4 MPa en el PLA puro hasta 62,4 MPa en la mezcla con 30 % de PHBV. Esto se debe a las débiles fuerzas interfaciales entre los polímeros constituyentes y a la limitada compatibilidad entre fases, como se detalla en la sección de morfología de la mezcla [4]. De forma similar, el módulo de Young (E) se reduce al incorporar PHBV, manteniéndose relativamente estable. Este comportamiento se debe a la menor rigidez del PHBV y a la limitada compatibilidad entre

fases, lo que reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos. En contraste, la deformación a la rotura ($\varepsilon_b$) aumenta ligeramente hasta 13,5 %, indicando una leve mejora de la ductilidad asociada a la mayor movilidad de las cadenas introducida por el PHBV. En cuanto a la dureza Shore D y la resistencia al impacto, se observa una disminución progresiva con el contenido de PHBV, lo que sugiere una menor cohesión interfacial en las mezclas.

En conjunto, la adición de PHBV reduce la rigidez y resistencia del PLA, pero aumenta ligeramente su ductilidad, mostrando un compromiso entre ambas propiedades.

## Análisis FTIR

Los espectros FTIR de PLA y sus mezclas con PHBV (Figura 2), muestran los picos característicos del PLA, que se mantienen tras la incorporación de PHBV.

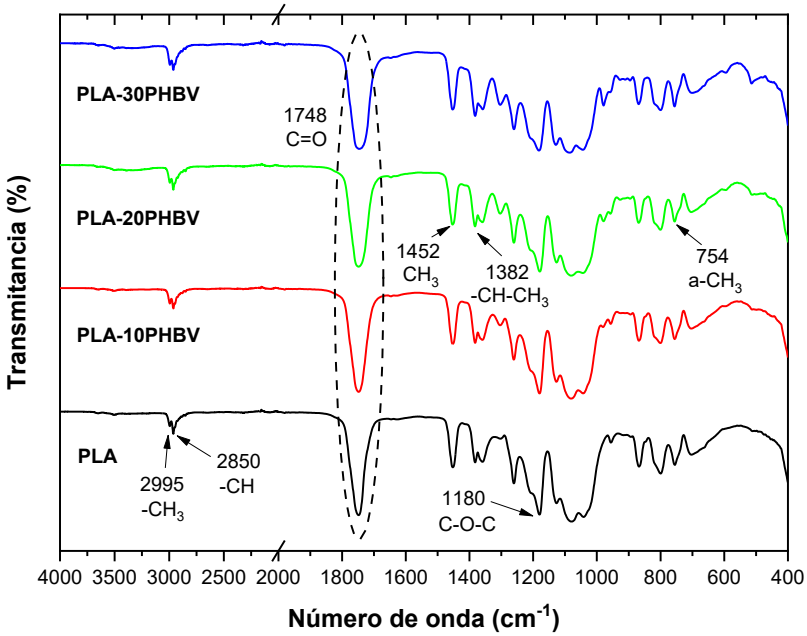



**Figura 2**. Espectros FTIR de PLA y mezclas PLA/PHBV.

En el PLA puro se identifican las bandas características asociadas al estiramiento del grupo carbonilo (C=O) en torno a 1748 $cm^{-1}$, el enlace C–O–C alrededor de 1180 $cm^{-1}$ y la vibración del grupo α-$CH_3$ en 754 $cm^{-1}$, entre otras señales típicas del poliéster. Asimismo, las bandas situadas en 2955 y 2850 $cm^{-1}$ se atribuyen a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico de los grupos –$CH_3$ y –CH, respectivamente, mientras que los picos a 1452 y 1382 $cm^{-1}$ corresponden a las vibraciones de flexión de los grupos $CH_3$ y CH–$CH_3$. En el PHBV se observan las bandas propias del carbonilo (~1708 $cm^{-1}$) y del enlace C–O–C (1248–1267 $cm^{-1}$), mientras que en las mezclas PLA/PHBV aparecen señales combinadas de ambos polímeros.

En las mezclas PLA-10PHBV y PLA-20PHBV no se observan nuevas bandas ni cambios relevantes, solo ligeras variaciones de intensidad, especialmente en las regiones del carbonilo y del C–O–C. Esto sugiere interacciones físicas entre cadenas poliméricas, sin evidencia de reacciones químicas ni formación de nuevos enlaces covalentes [3]. En resumen, los espectros confirman que no hay cambios en los grupos funcionales, indicando que el PHBV no modifica la estructura química del PLA.

## CONCLUSIONES

La incorporación de PHBV en matrices de PLA modifica de forma significativa sus propiedades térmicas, mecánicas y estructurales.

Los resultados de DSC muestran un aumento del grado de cristalinidad desde 8,9 % en PLA hasta 39,8 % en PLA-30PHBV, lo que indica que el PHBV actúa como agente nucleante y favorece la cristalinidad del PLA. Desde el punto de vista mecánico, se observa una reducción progresiva de la resistencia a tracción (de 76,4 a 62,4 MPa) y del módulo de Young (de 991 a ~746 MPa), debido a una menor cohesión interfacial. En contraste, la deformación a rotura aumenta ligeramente hasta 13,5 %, indicando un leve incremento de ductilidad. El análisis FTIR confirma la ausencia de nuevas bandas de absorción en las mezclas, lo que descarta reacciones químicas entre ambos polímeros y evidencia interacciones únicamente físicas.

En conclusión, el PHBV permite ajustar el comportamiento del PLA, incrementando su cristalinidad pero reduciendo progresivamente su rigidez y resistencia. La formulación PLA-10PHBV presenta el mejor equilibrio global, con ($\tau max$ = 68,9 MPa, E = 696,6 MPa, $\varepsilon_b$ = 12,5 %, $X_c$ = 18,6 %) y una resistencia al impacto de 34,6 kJ/m², mostrando el compromiso más favorable entre resistencia y ductilidad. Estos resultados refuerzan su interés para desarrollar materiales biodegradables con potencial en el ámbito biomédico.

## REFERENCIAS

[1] Kumar, V., Sehgal, R., & Gupta, R. (2021). Blends and composites of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and their applications. European Polymer Journal, 161, 110824. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110824

[2] Dwivedi, R., Pandey, R., Kumar, S., & Mehrotra, D. (2020). Poly hydroxyalkanoates (PHA): Role in bone scaffolds. Journal of Oral Biology and Craniofacial Research, 10(1), 389–392. https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2020.01.013

[3] Kuciel, S., Mazur, K., & Jakubowska, P. (2019). Novel biorenewable composites based on poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with natural fillers. Journal of Polymers and the Environment, *27*(4), 803–815. https://doi.org/10.1007/s10924-019-01392-4

[4] Kanda, G. S., Al-Qaradawi, I., & Luyt, A. S. (2018). Morphology and property changes in PLA/PHBV blends as function of blend composition. Journal of Polymer Research, 25(9), 196. https://doi.org/10.1007/s10965-018-1586-3

[5] Cai, Y., Lv, J., & Feng, J. (2013). Spectral characterization of four kinds of biodegradable plastics: Poly(lactic acid), poly(butylene adipate-co-terephthalate), poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) and poly(butylene succinate) by FTIR and Raman spectroscopy. Journal of Polymers and the Environment, 21, 108–114. https://doi.org/10.1007/s10924-012-0534-2

**AGRADECIMIENTOS** Alexandra Llidó Barragán agradece a la Universitat Politècnica de València el apoyo recibido a través de la beca predoctoral PAID-01-22. Asimismo, Cristina Pavón reconoce la ayuda postdoctoral PAID-10-23 de la Universitat Politècnica. Este trabajo se enmarca en el proyecto PID2023-152869OB-C22, financiado por MCIN/AEI y la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

# Efecto del tratamiento de tejidos de algodón con extractos de pulpa de café sobre el factor de protección ultravioleta.

**Vidurrizaga Hassinger, Andrea Corina [(1)], Gisbert Payá, Jaime[(1)], Belda Anaya, Raquel[(1)], Sánchez Martínez, Ainhoa[(1)]**

*(1) Universitat Politècnica de Valencia, Plaza Ferrandiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain; e-mail: anvi4@upv.edu.es*

## RESUMEN

El presente trabajo evalúa la influencia de la técnica de extracción de pulpa de café (CP) sobre la composición fenólica de los extractos y sobre el factor de protección ultravioleta (UPF) de tejidos de algodón tratados con ellos. La CP se procesó mediante tres métodos de extracción acuosa (infusión, Soxhlet y ultrasonidos) y los extractos se caracterizaron en términos de polifenoles totales, taninos condensados y taninos hidrolizables. Posteriormente, los extractos se aplicaron sobre tejidos de algodón blanqueado mediante tintura por agotamiento, evaluando el UPF de los tejidos antes y después de un ciclo de lavado normalizado, conforme a la norma AS/NZS4399. La infusión presentó mayor concentración de polifenoles totales y taninos hidrolizables, mientras que los ultrasonidos maximizaron el contenido de taninos condensados; la extracción por Soxhlet mostró valores más bajos en todos los parámetros. Todos los extractos incrementaron el UPF respecto al tejido blanco. La infusión alcanzó el nivel de buena protección antes del lavado, mientras que ultrasonidos y Soxhlet quedaron ligeramente por debajo. Tras el lavado, infusión y ultrasonidos conservaron mejor la estabilidad del UPF, lo que sugiere una relación directa entre la composición fenólica de los extractos y la permanencia de la funcionalidad UV en tejidos de algodón.

**Palabras clave:** Pulpa de café; compuestos fenólicos; polifenoles; taninos condensados; taninos hidrolizables; algodón; tintura por agotamiento; factor de protección ultravioleta (UPF); textiles sostenibles.

## INTRODUCCIÓN

La valorización de subproductos agroindustriales constituye una estrategia prioritaria dentro del desarrollo de procesos textiles más sostenibles, especialmente cuando dichos residuos contienen compuestos con potencial colorante o funcional. En este contexto, la pulpa de café ha despertado un interés creciente por su contenido en compuestos fenólicos, cafeína, pectinas y otros metabolitos de interés, lo que la convierte en una fuente prometedora para la obtención de extractos bioactivos mediante tecnologías de extracción convencionales y asistidas [1,2,3].

En fibras celulósicas como el algodón, la aplicación de extractos naturales presenta un interés particular, ya que muchos de estos compuestos pueden aportar simultáneamente color y funcionalidad [4]. Entre ellos, los compuestos fenólicos destacan por su elevada reactividad química y por la presencia de múltiples grupos hidroxilo capaces de interaccionar con la fibra textil [5,6], además de contribuir a propiedades como la actividad antioxidante y la protección frente a la radiación ultravioleta [7,8]. En particular, los polifenoles y taninos presentes en matrices vegetales pueden favorecer la absorción de radiación UV y aumentar el factor de protección ultravioleta (UPF) de los tejidos tratados [7,9,10].

En este contexto, la pulpa de café se presenta como una fuente de especial interés en polifenoles, taninos condensados y taninos hidrolizables, que pueden ser recuperados mediante distintas técnicas de extracción, como la infusión, la extracción Soxhlet o la extracción asistida por ultrasonidos. La comparación de estas técnicas resulta esencial para determinar su impacto sobre la composición fenólica de los extractos y, en consecuencia, sobre la funcionalidad de los tejidos tratados. A partir de este planteamiento, el presente estudio analiza la influencia de la técnica de extracción de pulpa de café sobre el contenido de polifenoles, taninos condensados e hidrolizables de los extractos, así como sobre el factor de protección ultravioleta de tejidos de algodón tratados con dichos extractos antes y después del lavado.

## OBJETIVOS

El objetivo general del estudio fue evaluar la influencia de la técnica de extracción de pulpa de café sobre la composición fenólica de los extractos y sobre el factor de protección ultravioleta (UPF) de tejidos de algodón tratados con dichos extractos.

Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

- Obtener extractos de pulpa de café mediante infusión, extracción Soxhlet y extracción asistida por ultrasonidos.
- Determinar el contenido de polifenoles totales, taninos condensados y taninos hidrolizables de los extractos obtenidos.
- Aplicar los extractos de pulpa de café sobre tejidos de algodón mediante un proceso de tintura por agotamiento.
- Evaluar el factor de protección ultravioleta (UPF) de los tejidos tratados antes y después del lavado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Se utilizó un tejido tafetán 100% algodón previamente blanqueado, con gramaje de 115 g/m². La pulpa de café empleada se obtuvo de productores del distrito de Villa Rica (Oxapampa, Pasco, Perú), correspondiente a la variedad TUPI–IAC 1669-33, que fue acondicionada (lavado, secado y triturado) obteniendo un tamaño de partícula de 500–1000 µm.

### Métodos de extracción, tintura y caracterización

Los extractos de pulpa de café se obtuvieron mediante extracciones sólido–líquido en agua, empleando tres técnicas: infusión, Soxhlet y ultrasonidos, manteniendo en todos los casos una relación muestra/disolvente de 1:12,5 m/v (1 g de pulpa en 12,5 mL de agua). En la extracción por infusión se trabajó con 16 g de pulpa en 200 mL de agua destilada a 98 °C durante 1 h bajo agitación mecánica. En la extracción Soxhlet se emplearon 24 g de muestra y 300 mL de agua, operando a la temperatura de ebullición durante 2 h. Para la extracción asistida por ultrasonidos se utilizaron 16 g de muestra en 200 mL de agua en un baño ultrasónico a 40 kHz y 76 °C durante 1 h. En todos los casos, los extractos se filtraron para eliminar sólidos y se protegieron de la luz hasta su utilización inmediata.

La caracterización de los extractos incluyó la cuantificación de polifenoles totales, taninos hidrolizables y taninos condensados siguiendo el protocolo descrito por Naima et al. [11], adaptado a pulpa de café. Para los polifenoles totales se empleó el método Folin–Ciocalteu, expresando los resultados como mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra seca. El contenido de taninos hidrolizables se determinó mediante ensayos con yodato potásico, utilizando ácido tánico como patrón y expresando los resultados como mg de equivalentes de ácido tánico por gramo de muestra. Los taninos condensados se evaluaron mediante el método butanol–HCl en presencia de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, midiendo la absorbancia a 530 nm y calculando el contenido como mg de equivalentes de cianidina por gramo de muestra a partir del coeficiente de extinción molar.

La tintura se llevó a cabo sobre tejidos blanqueados mediante la técnica de tintura por agotamiento con 50 mL de extracto de pulpa de café en 150 mL de agua destilada para 5 g de tejido, relación de baño 1:40, sulfato de sodio 10 g/L, carbonato sódico 15 g/L, pH 10, 98 °C y 75 min, seguido de enjuague con agua y secado.

La estabilidad del factor de protección ultravioleta (UPF) de los tejidos teñidos se estudió a partir de ensayos de solidez del color al lavado, realizados de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 105-C10:2006 (lavado con jabón). El UPF se determinó antes y después del ciclo de lavado para evaluar la permanencia de la funcionalidad UV.

### Medida del factor de protección ultravioleta (UPF)

La evaluación del factor de protección ultravioleta se efectuó midiendo la radiación UVA a 365 nm y UVB a 312 nm con radiómetro HD2102-2 y software Deltalog 9 y la clasificación de niveles de protección definida por la norma AS/NZS 4399.

**Tabla 1.** Categorización del nivel de protección UPF de textiles según norma AS/NZS 4399:1996.

| Rango de UPF | Categoría de protección | Transmitancia UVR efectiva (%) | Clasificación |
|---|---|---|---|
| **15 – 24** | Buena protección | 6.7 y 4.2 | 15, 20 |
| **25 – 39** | Muy buena protección | 4.1 y 2.6 | 25, 30, 35 |
| **40 – 50, 50+** | Excelente protección | ≤2.5 | 40, 45, 50, 50+ |

## RESULTADOS

### Resultados de la caracterización de los extractos (Contenido de polifenoles y taninos)

La **Tabla 2** recoge el contenido de polifenoles totales, taninos condensados y taninos hidrolizables en los extractos de pulpa de café obtenidos por infusión, Soxhlet y ultrasonidos. La infusión proporcionó la mayor concentración de polifenoles totales, con 0,280 mg GAE/gCP, seguida de la extracción por ultrasonidos (0,203 mg GAE/gCP), mientras que Soxhlet presentó el valor más bajo (0,186 mg GAE/gCP). En el caso de los taninos condensados, el método asistido por ultrasonidos resultó el más eficaz, alcanzando 1,594 mg Cya/gCP, por encima de la infusión (1,253 mg Cya/gCP) y de Soxhlet (0,683 mg Cya/gCP). Para los taninos hidrolizables, la infusión volvió a destacar con un contenido claramente superior (5,991 mg TAE/gCP), frente a los valores mucho más reducidos obtenidos por ultrasonidos (0,616 mg TAE/gCP) y Soxhlet (0,647 mg TAE/gCP).

**Tabla 2:** Contenido de polifenoles, T. condensados y T. hidrolizables de los extractos de pulpa de café.

| Tipo de extracción | Polifenoles | Taninos condensados | Taninos hidrolizables |
|---|---|---|---|
| | mg GAE/gCP | mg Cya/gCP | mg TAE/gCP |
| **Infusión** | 0,280 ± 0,005 | 1,253 ± 0,005 | 5,991 ± 0,005 |
| **Soxhlet** | 0,186 ± 0,005 | 0,683 ± 0,005 | 0,616 ± 0,005 |
| **Ultrasonidos** | 0,203 ± 0,005 | 1,594 ± 0,005 | 0,647 ± 0,005 |

Estos resultados ponen de manifiesto que la eficiencia de extracción depende de manera notable de la técnica empleada: la infusión maximiza la recuperación de polifenoles totales y taninos hidrolizables, mientras que los ultrasonidos favorecen la extracción de taninos condensados. Por el contrario, la extracción por Soxhlet mostró los rendimientos más bajos en los tres parámetros evaluados, lo que sugiere que las condiciones del proceso (temperatura de ebullición y tiempo prolongado) pueden favorecer la degradación o transformación de determinados compuestos fenólicos más sensibles.

### Resultados de factor de protección ultravioleta (UPF)

La **Tabla 3** muestra los valores del factor de protección ultravioleta (UPF) para el tejido de algodón blanco y para los tejidos teñidos con extractos de pulpa de café obtenidos por infusión, Soxhlet y ultrasonidos, medidos antes y después del lavado. El tejido de referencia (blanco) presentó un UPF de 10,736 tanto antes como después del lavado, situándose por debajo del umbral de buena protección definido por la norma AS/NZS 4399. En todos los casos, la aplicación de extractos de pulpa de café incrementó el UPF respecto al blanco, acercándose al rango de buena protección en el caso de infusión y ultrasonidos.

**Tabla 3.** UPF de tejidos tratados con extractos de pulpa de café.

| Referencia de tejido | UPF | |
|---|---|---|
| | S/lavar | Lavado |
| **Tejido sin tratamiento** | 10,736 | 10,736 |
| **Ultrasonidos** | 14,369 | 14,349 |
| **Soxhlet** | 13,961 | 12,364 |
| **Infusión** | 15,964 | 13,749 |

Entre los métodos de extracción, la infusión proporcionó el valor inicial de UPF más elevado (15,964), seguido de ultrasonidos (14,369) y Soxhlet (13,961). Tras el lavado, los tejidos tratados con extractos por ultrasonidos mantuvieron prácticamente inalterado su UPF (14,349), mientras que los tejidos tratados con extractos por infusión y Soxhlet experimentaron descensos más acusados, hasta 13,749 y 12,364 respectivamente. Estos resultados sugieren que, aunque todos los extractos mejoran la respuesta UV del algodón frente al tejido blanco, los obtenidos por infusión y, sobre todo, por ultrasonidos se sitúan más próximos al nivel de buena protección y presentan una estabilidad frente al lavado más favorable que los obtenidos por Soxhlet, en coherencia con los mayores contenidos de polifenoles y taninos determinados para estas técnicas. En conjunto, los valores de UPF se situaron entre aproximadamente 10,74 y 15,96; el tejido tratado con el extracto por infusión alcanzó, antes del lavado, el límite inferior del rango 15–24 definido como “buena protección” por AS/NZS 4399, mientras que tras el lavado todos los tratamientos quedaron por debajo de dicho intervalo, lo que indica que las mejoras observadas son moderadas pero prometedoras de cara a futuras optimizaciones.

## CONCLUSIONES

- La pulpa de café se confirmó como una fuente relevante de compuestos fenólicos, con contenidos de polifenoles totales y taninos (condensados e hidrolizables) dependientes de la técnica de extracción empleada. La infusión maximizó la recuperación de polifenoles totales y taninos hidrolizables, mientras que los ultrasonidos favorecieron la extracción de taninos condensados, y la extracción por Soxhlet mostró los rendimientos más bajos en todos los casos.
- Los tratamientos por tintura con extractos de pulpa de café incrementaron entre un 26 y un 38% el factor de protección ultravioleta (UPF) de los tejidos de algodón respecto al tejido blanco. El extracto obtenido por infusión alcanzó, antes del lavado, el umbral de "buena" protección definida por la norma AS/NZS 4399, mientras que los extractos por ultrasonidos y Soxhlet se situaron ligeramente por debajo de dicho rango.
- La estabilidad del UPF frente al lavado fue superior en los tejidos tratados con extractos obtenidos por infusión y ultrasonidos que en los tratados con extractos Soxhlet, en coherencia con sus mayores contenidos de polifenoles y taninos. En particular, los extractos ricos en taninos condensados mostraron una menor pérdida de funcionalidad UV tras el lavado.
- La combinación de datos de composición fenólica y de UPF sugiere que tanto la naturaleza como la proporción relativa de polifenoles y taninos influyen en la capacidad de los extractos de pulpa de café para aportar y mantener la protección UV en tejidos de algodón.
- A pesar de las mejoras observadas, el nivel de protección alcanzado sigue siendo limitado para aplicaciones donde se requiera un UPF elevado, por lo que futuros trabajos deberían centrarse en optimizar las condiciones de extracción, explorar el uso de otros disolventes o mezclas hidroalcohólicas que incrementen la recuperación de compuestos fenólicos, incrementar la concentración de extractos aplicados, explorar sistemas de anclaje adicionales y evaluar combinaciones con otros colorantes naturales ricos en compuestos fenólicos.

## REFERENCIAS

[1] Serna-Jiménez, Johanna; Torres Valenzuela, Laura Sofía; Sanin, Alejandra; Roldan, C.; Martín Santos, María Ángeles; Siles López, José Ángel. (2023). Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods. *LWT*, vol. 177, p. 114571, https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.114571

[2] Manasa, Vallamkondu; Padmanabhan, Aparna; Anu Appaiah, K. A. (2021). Utilization of coffee pulp waste for rapid recovery of pectin and polyphenols for sustainable material recycle. *Waste Management*, vol. 120, pp. 762–771, https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.10.045

[3] González-González, Gerardo Manuel; Palomo-Ligas, Lissethe; Nery-Flores, Sendar Daniel; Ascacio-Valdés, Juan Alberto; Sáenz-Galindo, Aidé; Flores-Gallegos, Adriana Carolina; Akmar-Zakaria, Zainul; N. Aguilar, Cristobal; Rodríguez-Herrera, Raúl. (2022). Coffee pulp as a source for polyphenols extraction using ultrasound, microwave, and green solvents. *Environmental Quality Management,* vol. 32, no. 1, pp. 451–461, https://doi.org/10.1002/tqem.21903

[4] Smeriglio, Antonella; Barreca, Davide; Bellocco, Ersilia; Trombetta, Domenico. (2017). Proanthocyanidins and hydrolysable tannins: occurrence, dietary intake and pharmacological effects. *British Journal of Pharmacology*, vol. 174, no. 11, pp. 1244–1262, https://doi.org/10.1111/bph.13630

[5] Santulli, Carlo; Gabrielli, Serena; Roselli, Graziella. (2025). Use and Roles of Tannins in Polysaccharide-Based Bioplastics and Biocomposites. *Organics*, vol. 6, no. 2, p. 19, https://doi.org/10.3390/org6020019

[6] Le Bourvellec, Carine; M.G.C. Renard, Catherine. (2019). Interactions Between Polyphenols and Macromolecules: Effect of Tannin Structure. *Encyclopedia of Food Chemistry*, pp. 515–521, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21486-8

[7] Grifoni, Daniele; Bacci, Laura; Zipoli, Gaetano; Albanese, Lorenzo; Sabatini, Francesco. (2011). The role of natural dyes in the UV protection of fabrics made of vegetable fibres. *Dyes and Pigments*, vol. 91, no. 3, pp. 279–285, https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.04.006

[8] Sinnur, H. D.; Samanta, Ashis Kumar; Verma, D. K.; Kaware, Runali. (2017). Studies on Coloration and UV Protective Action of Anar Peel (Pomegranate Rind) as an Effective Natural Colorant for Cotton Khadi Fabric. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E,* vol. 99, no. 1, pp. 9–26, https://doi.org/10.1007/s40034-017-0106-z

[9] Kamboj, Arpana; Medha, Kumari; Gupta, Vandana; Jose, Seiko. (2024). Ultraviolet protection of textiles with herbal dyes: A contemporary review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 41, p. 101689, https://doi.org/10.1016/J.SCP.2024.101689

[10] Benli, Hüseyin. (2024). Bio-mordants: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 31, no. 14, p. 20714, https://doi.org/10.1007/S11356-024-32174-8

[11] Naima, Rhazi; Oumam, M.; Hannache, H.; Sesbou, A.; Charrier, B.; Pizzi, A.; Charrier - El Bouhtoury, F. (2015). Comparison of the impact of different extraction methods on polyphenols yields and tannins extracted from Moroccan Acacia mollissima barks. *Industrial Crops and Products*, vol. 70, pp. 245–252, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.016

# NEWTON-TYPE METHODS IN QUANTUM COMPUTING

**Chinesta, Francisco[(1)], Cordero, Alicia [(2)], Gravot, Eloi[(3)] , Torregrosa, Sergio[(3)] , Torregrosa, Juan R.[(2)]**

*(1)* CNRS@CREATE Ltd., 1 CREATE Way, 08-01, CREATE Tower, 138602 Singapore – francisco.chinesta@cnrs.fr

(2) Instituto de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, Cno. De Vera s/n, 46022 València, Spain.
acordero@mat.upv.es, jrtorre@mat.upv.es

(3) ENSAM Institute of Technology, PIMM, UMR CNRS 8006, 151 Boulevard de l'Hopital, 75013 Paris, France.
sergio.torregrosa_jordan@ensam.eu, eloi.gravot@epfedu.fr

## ABSTRACT

The solution of large-scale nonlinear systems remains a bottleneck in most engineering and scientific fields. We present a classical–quantum hybrid framework that combines an optimal vectorial iterative scheme with sub-problems expressed as QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) and solved on quantum annealers. The linear correction step of Newton-type methods is replaced by a binary optimisation that preserves the Jacobian structure via a low-rank approximation. Numerical experiments (a nonlinear oscillator and a 2-D Navier–Stokes cavity flow) demonstrate that the hybrid strategy maintains the typical accuracy of classical methods while achieving a noticeable reduction in wall-time, opening the way to real-time simulations as quantum hardware evolves.

**Keywords:** hybrid algorithms, quantum annealing, QUBO, nonlinear systems, iterative methods, real-time computing.

## INTRODUCTION

The size of some nonlinear real-life problems makes unaffordable their solution by means of standard techniques. The connection of optimal iterative methods for solving nonlinear systems with Quantum Bridge Analytics will allow us to solve the problems posed in real-time. The role of quantum calculation in the resolution of the linear systems involved in each iteration in the fixed-point nonlinear solvers is a key element in this research.

We aim to develop new iterative schemes able to solve nonlinear problems with reliability, efficiency, and robustness, indeed in very big-sized systems. Often, this kind of problem is approached using fixed-point procedures. In general, these methods need to solve, at least, one linear system of the same size as the nonlinear one (per iteration). So, the known linear solvers do not work. We aim to combine novel high-order optimal vectorial [1], or maximally efficient, iterative schemes with a Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) formulations for solving the linear systems involved [2], making it feasible to work with hybrid classical-quantum computers. Moreover, we aim to approach nonlinear matrix problems

In these terms, our approach is: in case of finding a nonlinear system through different procedure as finite element or divided differences, avoiding the linearization process is a deal to preserve the richness of the set of solutions. In this sense, highly efficient ad-hoc iterative schemes should be used to approach this solution. The use of hybrid algorithms, combining classical and quantic operators, may be the key to optimize

efficiency and precision. For example, the vectorial schemes provided in [3] are optimal and highly efficient schemes that have been recently designed by the authors. For any linear system appearing in each iteration of the nonlinear process, we find its solution by means of QUBO formulations. This process can be solved in a minimum time by quantum computing, and the iteration process can be continued in classical computing until another linear system is solved.

Quantum computing rests on two essential phenomena of quantum mechanics: superposition and entanglement [5]. Superposition allows a qubit to exist simultaneously in the logical states 0 and 1; entanglement creates correlations between qubits that cannot be reproduced with classical systems. Thanks to these properties, quantum devices can explore solution spaces whose size grows exponentially with the number of qubits, giving theoretical advantages for certain optimisation and simulation problems.

Two families of quantum hardware coexist today:

- Gate-based processors (IBM, IonQ, Rigetti, …) implement universal circuits via sequences of quantum gates. Their versatility is high, but the limited number of high-fidelity qubits restricts practical advantage.
- Quantum annealers (D-Wave) [4] perform an adiabatic evolution from a simple Hamiltonian $H_0$ to a problem Hamiltonian $H_P$ whose ground-state encodes an Ising or QUBO cost function. Although their scope is narrower, substantial speed-ups have already been observed in combinatorial problems.

The hybrid classical-quantum paradigm seeks to combine the flexibility of traditional algorithms with the optimisation power of annealers. In Newton-type methods, the most expensive step is the solution of the linear system

$$F'\left(x^{(k)}\right)\Delta\, x^{(k)} = -F(x^{(k)}),$$

where $F'$ is the Jacobian of the nonlinear function $F$. Reformulating this step as a QUBO problem and delegating it to an annealer can drastically reduce the computational load, especially when $F'$ is dense and large.

## QUANTUM COMPUTING BACKGROUND

A qubit is represented in Dirac notation

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,\ \ |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

and can be visualised on the Bloch sphere (Figure 1). The adiabatic principle guarantees that a system prepared in the ground state of $H_0$ remains in the instantaneous ground state while the Hamiltonian is slowly transformed to $H_P$. When

$$H_P = \sum_i h_i s_i + \sum_{i<j} J_{ij} s_i s_j\ , s_i \in \{-1, +1\},$$

the annealing process looks for the spin configuration that minimises the energy, which is mathematically equivalent to solving a QUBO

$$min_{b\in\{0,1\}^m}, b^T Q b\ +\ c^T b,$$

where Q and c are directly obtained from the coefficients $h_i$ and $J_{ij}$.

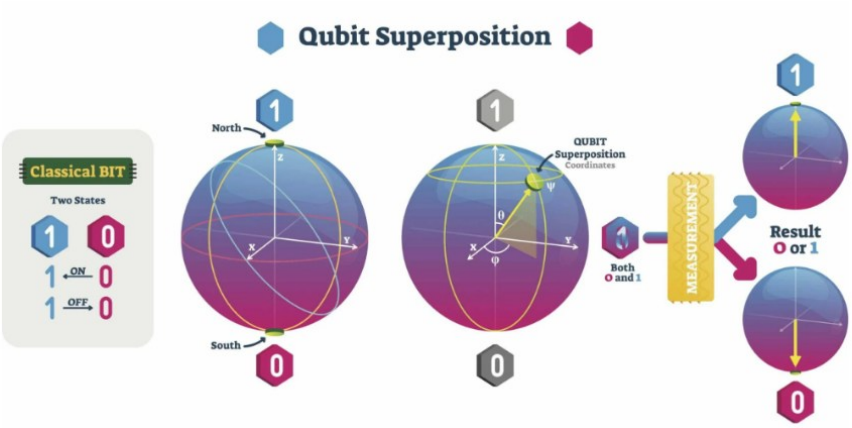



**Figure 1.** Bloch-sphere representation of a qubit. (cujo.com/blog/def--con--quals--ctf--2021--the--chsh--game--entangled--qubits--and--decrypting--the--flag/)

## OPTIMAL VECTORIAL ITERATIVE SCHEME

Let $F: R^n \rightarrow R^n$ be a nonlinear function. The optimal vectorial iterative method [3] to be applied for solving $F(x) = 0$ has the following iterative expression:

$$y^{(k)} = x^{(k)} - \left[F'\left(x^{(k)}\right)\right]^{-1} F\left(x^{(k)}\right), \qquad k = 0,1,2,\ldots$$

$$x^{(k+1)} = y^{(k)} - \left[F'\left(x^{(k)}\right)\right]^{-1}\left[(1+v_k)F(y^{(k)}) + 2v_k F\left(x^{(k)}\right)\right],$$

being

$$v_k = \frac{F\left(y^{(k)}\right)^T F(y^{(k)})}{F(x^{(k)})^T F(x^{(k)})} \in R.$$

Two full linear systems must be solved at each iteration, both with the same Jacobian matrix.

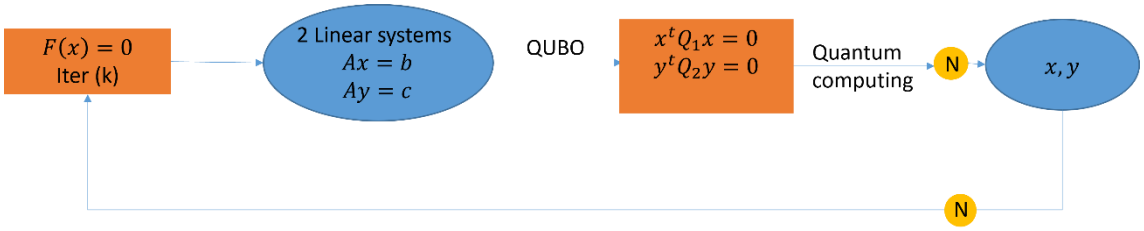



**Figure 2.** Hybrid algorithm schematic: classical low-rank Jacobian computation, QUBO generation, quantum annealing, and state update.

This scheme is optimal in the sense of Cordero-Torregrosa conjecture [1]: given any vectorial Newton-type iterative scheme, with $k_1$ evaluations of the Jacobian matrix and $k_2$ of the nonlinear function per iteration, its order of convergence p satisfies $p \leq 2^{k_1+k_2-1}$. It is optimal when $p = 2^{k_1+k_2-1}$, and $k_2 \geq k_1$.

In Figure 3 we compare the computational efficiency index (CEI) calculated as

$$CEI = p^{\frac{1}{k_1+k_2+op}},$$

where op is number of products/quotients per iteration. The optimal vectorial fourth-order method Opt4Q shows to have better efficiency index than optimal second-order NwQ.

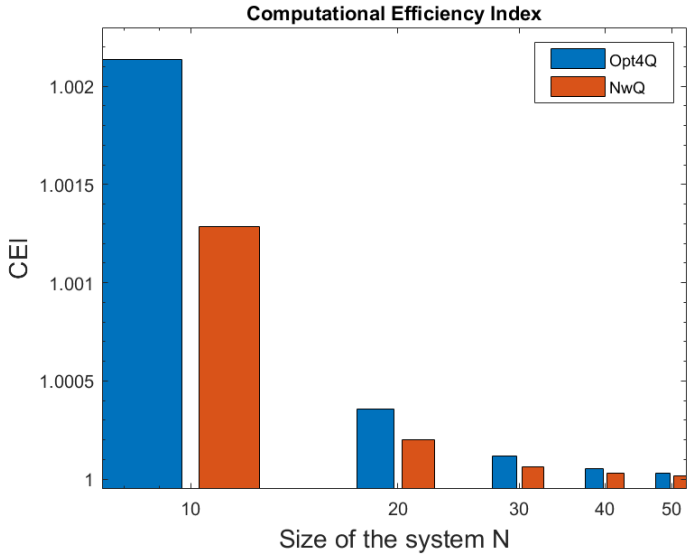



**Figure 3.** Computational efficiency indices of fourth- and second-order optimal methods.

The linear systems to be solved per iteration have been transformed in QUBO problem by using [2]. The practical implementation has been made by means of R2024b: MATLAB Support Package for Quantum Computing, whose QUBO solver uses stochastic variables (TABU).

## *NUMERICAL EXPERIMENTS*

Two benchmark problems with distinct characteristics have been solved by using double precision arithmetic and the computer Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU 3.00GHZ 32Gb RAM.

**Example 1:** The first test case is a system of $n = 50$ nonlinear equations, with a maximum number of iterations of 50 and the stopping criterium $\|F(x^{(k+1)})\| < 10^{-6}$. Moreover, for a nonlinear system of size $N$, *the number of qbits used is 2,* and the size of *Q* matrix is $Q \in \mathcal{M}_{(2\cdot nBits\cdot N)\times(2\cdot nBits\cdot N)}$.

$$\begin{aligned} x_i x_{i+1} - 1 &= 0, \quad i = 1, \dots, N-1, \\ x_N x_1 - 1 &= 0, \end{aligned}$$

with solutions: $\bar{x}_1 = (1,1,\dots,1)^T$, $\bar{x}_2 = (-1,-1,\dots,-1)^T$.

**Table 1.** Numerical results on Example 1.

| Method | $x^{(0)}$ | iter | $\|F(x^{(k+1)})\|$ | cputime(s) |
|---|---|---|---|---|
| NwQ | $(5,\dots,5)$, $N = 11$ | 50 | 3.1623 | 26.5156 |
| | $(2,3,\dots,8)$ | 4 | 0.0 | 2.2656 |
| | $(10,-1,7,-5)$ | 50 | 2 | 27.0312 |
| | $(2,5,7,-3,6)$ | 4 | 0.0 | 2.2656 |
| Opt4Q | $(5,\dots,5)$, $N = 11$ | 2 | 0.0 | 2.6406 |
| | $(2,3,\dots,8)$ | 2 | 0.0 | 2.1094 |
| | $(10,-1,7,-5)$ | 5 | 0.0 | 5.5000 |
| | $(2,5,7,-3,6)$ | 2 | 0.0 | 2.2984 |

In Table 1 we can observe that good results are obtained, with bigger systems, and OPT4 gets convergence even with seeds far from the solution.

The calculated time ratios are:

$$100\,\frac{cputime_{Opt4Q}}{cputime_{NwQ}} = (10.73, 93.11, 20.35, 101.45),$$

showing that the execution time of the Opt4Q method is lower than those of NwQ scheme in the first three initial estimations.

**Example 2:** The second nonlinear system is of smaller size, but formed by non-polynomial functions

$$\begin{aligned} cos(x) - xy + z^2 - 2 &= 0, \\ xz + 2x + exp(x) - y^2 &= 0, \\ z^2 - 2y + exp(z) &= 0. \end{aligned}$$

Its solutions are: $\bar{x}_1 = (0,1,-1)^T$, and $\bar{x}_2 = (0,1,1)^T$.

The numerical results of both methods on Example 2 are shown in Table 2. It must be noticed that non-integer initial estimations have been tested with bad results. However, far initial guesses have obtained very good results in case of Opt4Q method, in terms of cpu time, compared to NwQ. The time rations in this case are:

$$100\frac{cputime_{Opt4Q}}{cputime_{NwQ}} = (194.89, 7.41, 60.34, 4.36, 130.94).$$

**Table 2.** Numerical results on Example 2.

| Method | $x^{(0)}$ | iter | $\|F(x^{(k+1)})\|$ | cputime(s) |
|---|---|---|---|---|
| NwQ | $(2,5,7)$ | 3 | 0.0 | 42.2344 |
| | $(1,0,0)$ | 45 | 0.0 | 43.6250 |
| | $(10,8,-7)$ | 11 | 0.0 | 48.2656 |
| | $(3,3,3)$ | 50 | 2.4359 | 972.9219 |
| Opt4Q | $(2,5,7)$ | 2 | 0.0 | 82.3125 |
| | $(1,0,0)$ | 2 | 0.0 | 3.2344 |
| | $(10,8,-7)$ | 5 | 0.0 | 29.1250 |
| | $(3,3,3)$ | 2 | 0.0 | 42.4266 |

## *CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES*

The study shows that optimal fourth-order Quantum-based Opt4Q method can reach a solution faster than the corresponding partner of Newton's schme, NwQ. Converting the problem into a QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) format cuts the time needed for the calculations. Mixing classical steps with quantum steps in a hybrid scheme takes advantage of both approaches, which speeds up the overall process.

Looking ahead, the next steps will test hybrid algorithms on real-time nonlinear problems and expand them to handle nonlinear matrix problems. The plan also includes comparing the new method with the latest state-of-the-art solvers to see how efficient it really is. Finally, the team will explore how well the approach scales as quantum hardware improves and offers more qubits and better performance.

## *REFERENCES*

[1] Arroyo, V., Cordero, A., Torregrosa, J.R. (2011). "Approximation of artificial satellites' preliminary orbits: the efficiency challenge". *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 1802-1807.

[2] Jun, K. (2024). "QUBO formulations for a system of linear equations". *Results in Control and Optimization*, 14, 100380.

[3] Cordero, A., Rojas-Hiciano, R.V., Torregrosa, J.R., Vassileva, M.P. (2024). "A highly efficient class of optimal fourth-order methods for solving nonlinear systems". *Numerical Algorithms*, 95, 1879-1904.

[4] D-Wave Systems, Advantage System Documentation, 2023. https://docs.dwavequantum.com/en/latest/quantum_research/index.html#index-

quantum-research.
[5] Nielsen, M. A., Chuang, I. L. “Quantum Computation and Quantum Information”, Cambridge University Press, 2020.

# Finding Simultaneous Solutions of Nonlinear Problems

**Cordero, Alicia(1), Garrido, Neus(1), Torregrosa, Juan R.(1), Triguero-Navarro, Paula(1)**

*(1) Instituto de Matemáticas Multidisciplinar, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, España (acordero@mat.upv.es; neugarsa@mat.upv.es; jrtorre@mat.upv.es; ptrinav@mat.upv.es)*

## ABSTRACT

The approximation of solutions of nonlinear equations and nonlinear systems is a classical topic in numerical analysis. In this work, we design simultaneous iterative schemes capable of approximating several roots at once. Starting from the classical Weierstrass–Durand–Kerner and Ehrlich methods, we present a general framework that transforms scalar iterative schemes into simultaneous procedures with higher convergence order. Extensions to nonlinear systems and Jacobian-free variants are also discussed. Several numerical examples illustrate the efficiency and stability of the proposed approaches, confirming the theoretical results.

**Keywords:** iterarive methods, simultaneous solutions, nonlinear problems, Ehlich methods.

## INTRODUCTION

The numerical solution of nonlinear equations and systems is a central topic in scientific computing and applied mathematics. Problems of this type appear naturally in a wide range of applications, including engineering design, physics, optimization, economics, fluid mechanics, dynamical systems, signal processing, and machine learning. In most realistic situations, explicit analytical solutions are unavailable, and therefore efficient numerical techniques are required in order to approximate the desired solutions.

Let us consider the nonlinear problem

$$F(x) = 0,$$

where

$$F : D \subseteq R^m \to R^m,\ m \geq 1,$$

is a nonlinear operator defined on a domain D. The objective is to determine one or several vectors $\bar{x} \in D$ satisfying the previous equation. When m = 1, the problem reduces to a scalar nonlinear equation, whereas for m > 1 we obtain a nonlinear system.

Iterative methods constitute the most common strategy for solving nonlinear problems. Starting from an initial estimation $x^0 \in R^m$, these methods generate a sequence of approximations $\{x^k\}, k \geq 0$, which converges to the desired root under suitable assumptions on the nonlinear operator and the starting point. Among the best-known procedures are Newton's method, Steffensen's method, Traub's scheme, and their many variants and higher-order extensions.

A key aspect in the analysis of iterative schemes is their local order of convergence. Given a root $\boldsymbol{x}$ the convergence order p is characterized by the error equation

$$\boldsymbol{e_{k+1} = Me_k^p + O(e_k^{p+1})}$$

where

$$e_k = x^{(k)} - \boldsymbol{x},$$

and M is a nonzero constant.

Methods with larger values of p usually require fewer iterations to achieve a prescribed accuracy, although this improvement may involve additional computational cost.

In practical computations, the convergence order is often estimated numerically by means of the approximated computational order of convergence (ACOC),

$$p \approx ACOC = \frac{Ln(\|x^{(k+1)}-x^{(k)}\|/\|x^{(k)}-x^{(k-1)}\|)}{Ln(\|x^{(k)}-x^{(k-1)}\|/\|x^{(k-1)}-x^{(k-2)}\|)}, \; k = 2,3, \ldots$$

Classical iterative schemes are usually designed to approximate a single solution. However, many applications require the simultaneous computation of several roots. This situation appears naturally in polynomial root finding, bifurcation problems, nonlinear eigenvalue problems, and systems with multiple physically meaningful equilibria.

A naive strategy consists of applying a one-point or multipoint iterative method repeatedly with different initial estimations. Nevertheless, this approach may present important drawbacks:

(i) high sensitivity to the choice of initial guesses,

(ii) convergence of several initial points toward the same solution,

(iii) loss of efficiency due to repeated computations,

(iv) poor stability properties in the presence of close roots.

These difficulties motivated the development of simultaneous iterative schemes, whose purpose is to approximate several roots at the same time while preserving stability and improving computational efficiency. The classical Weierstrass–Durand–Kerner and Ehrlich methods are representative examples of this approach and constitute the basis for many modern simultaneous algorithms.

In this work, we review several simultaneous iterative procedures for nonlinear equations and nonlinear systems. First, classical simultaneous methods for polynomial equations are presented. Next, a general framework capable of transforming scalar iterative methods into simultaneous schemes with increased convergence order is described. The extension to nonlinear systems is then considered, together with Jacobian-free variants suitable for high-dimensional problems and applications where derivative evaluations are expensive or unavailable. Finally, several numerical experiments illustrate the performance and robustness of the proposed techniques.

## CLASSICAL SIMULTANEOUS METHODS

The study of simultaneous methods for polynomial root finding dates back to the work of Weierstrass [1], later reformulated independently by Durand [2] and Kerner [3]. Let

$$p(x) = x^n + a_1 x^{n-1} + \ldots + a_n$$

be a polynomial with simple roots $\alpha_1,\ \alpha_2, \ldots, \alpha_n$.

Given an initial approximation

$$\boldsymbol{x^{(0)} = \left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \ldots, x_n^{(0)}\right)^T},$$

the Weierstrass–Durand–Kerner method is defined by

$$\boldsymbol{x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - \frac{p\left(x_i^{(k)}\right)}{\prod_{j \neq i}\left(x_i^{(k)} - x_j^{(k)}\right)},\ \ i = 1, 2, \ldots, n.}$$

This method converges quadratically to the vector of roots $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)^T$. Kerner proved that this iterative scheme can be interpreted as Newton's method applied to a nonlinear system involving the elementary symmetric polynomials

$$\boldsymbol{f_i(x) = (-1)^i \phi_i(x) - a_i,}$$

where

$$\boldsymbol{\phi_i\,(x) = \sum_{1 \le j_1 < \cdots < j_i \le n} x_{j_1} x_{j_2} \cdots x_{j_i}\ .}$$

A higher-order alternative was introduced by Ehrlich. The Ehrlich method is given by

$$\boldsymbol{x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - \frac{p\left(x_i^{(k)}\right)}{p'\left(x_i^{(k)}\right) - p\left(x_i^{(k)}\right)\sum_{j \neq i} \frac{1}{x_i^{(k)} - x_j^{(k)}}}\},\ \ i = 1, 2, \ldots, n.}$$

This method achieves cubic convergence and significantly improves the stability properties of the classical Weierstrass scheme.

## GENERAL SOMULTANEOUS ITERATIVE SCHEMES

A general framework for constructing simultaneous iterative methods, for a general nonlinear equation $f(x) = 0$, can be obtained by combining a scalar iterative scheme with an Ehrlich-type correction. Let $\phi$ be an iterative method with convergence order p. The associated simultaneous scheme, denoted by $\phi_s$, is defined by

$$\begin{cases} y_i^{(k)} = \phi\left(x_i^{(k)}\right), \\ x_i^{(k+1)} = y_i^{(k)} - \dfrac{f\left(y_i^{(k)}\right)}{f'\left(xy_i^{(k)}\right) - f\left(y_i^{(k)}\right)\sum_{j \neq i} \dfrac{1}{y_i^{(k)} - y_j^{(k)}}}\}, \ \ i = 1,2, \ldots, n \end{cases}$$

This construction presents remarkable theoretical properties:

a) for arbitrary nonlinear functions, the convergence order is doubled from p to 2p,

b) for polynomial equations, the order increases from p to 3p.

Therefore, starting from a second-order scalar method such as Newton's method, one obtains a fourth-order simultaneous method. Similarly, higher-order scalar schemes produce very efficient simultaneous procedures.

**Numerical Example**

Consider the nonlinear equation

$$f(x) = e^{x^2} - x = 0$$

Using the initial estimations $x^{(0)} = (-i, i)$, and the stopping criterion

$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\left\|f(x_i^{(k+1)})\right\| < 10^{-200}$,

the obtained results are summarized in the following Table 1

**Table 1.** Numerical results.

| Method | $\|\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\|\|$ | $\|\|f(x^{(k+1)})\|\|$ | Iterations | ACOC |
|---|---|---|---|---|
| $N_s$ | $1.7826 \times 10^{-390}$ | $5.009 \times 10^{-1560}$ | 6 | 4.0 |
| $S_s$ | $5.2222 \times 10^{-794}$ | $1.0446 \times 10^{-3173}$ | 7 | 4.0 |
| Ehrlich | $2.6495 \times 10^{-371}$ | $9.9211 \times 10^{-742}$ | 12 | 2.0 |

The simultaneous variants clearly outperform the classical Ehrlich scheme in terms of convergence speed.

## EXTENSION TO NONLINEAR SYSTEMS

The previous ideas can be extended to vectorial nonlinear problems. Let

$$F: R^m \to R^m$$

be a nonlinear system $F(x) = 0$.

Given an iterative method $\Phi$ with convergence order p, the simultaneous vectorial scheme $PS_\Phi$ is defined by

$$\begin{cases} y_i^{(k)} = \Phi\left(x_i^{(k)}\right), \\ x_i^{(k+1)} = y_i^{(k)} - \left[F'\left(y_i^{(k)}\right) - F\left(y_i^{(k)}\right) S_i\left(y^{(k)}\right)\right]^{-1}, \end{cases}$$

where

$S_i\left(y^{(k)}\right) = (S_{i,1}, S_{i,2}, \ldots, S_{i,n},)$,

with

$S_{i,r}\left(y^{(k)}\right) = \sum_{j \neq i} \frac{1}{y_{i,r}^{(k)} - y_{j,r}^{(k)}}$.

If $\Phi$ has convergence order p, then the simultaneous scheme $PS_\Phi$ reaches order 2p.

**Intersection of a Circle and an Ellipse**

Consider the system

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 2, \\ 3x^2 + 2xy + 3y^2 = 5, \end{cases}$$

This system corresponds to the intersection between a circle and an ellipse. Using four initial estimations and a tolerance of $10^{-50}$, the numerical results are shown in Table 2.

**Table 2.** Results for the intersection problem.

| Method | $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\|$ | $\|F(x^{(k+1)})\|$ | Iterations | ACOC |
|---|---|---|---|---|
| PS | $2.1809 \times 10^{-39}$ | $1.5874 \times 10^{-77}$ | 8 | 1.9993 |
| $PS_N$ | $1.6021 \times 10^{-94}$ | $5.635 \times 10^{-188}$ | 4 | 3.5975 |
| $PS_{N2}$ | $2.5749 \times 10^{-45}$ | $2.6135 \times 10^{-362}$ | 3 | 9.2015 |

The numerical evidence confirms the substantial acceleration achieved by higher-order simultaneous methods.

## JACOBIAN-FREE SIMULTANEOUS SCHEMES

In many practical applications, evaluating the Jacobian matrix may be computationally expensive or even unavailable. To overcome this difficulty, Jacobian-free simultaneous methods have been proposed.

The iterative scheme JFSΦ replaces the Jacobian matrix by a divided-difference approximation

$$\begin{cases} y_i^{(k)} = \Phi\left(x_i^{(k)}\right), \\ x_i^{(k+1)} = y_i^{(k)} - \left(\left[x_i^{(k)}, x_i^{(k)} + \beta_i F\left(x_i^{(k)}\right); F\right] - F(y_i^{(k)}) S_i(y^{(k)})\right)^{-1}, \end{cases}$$

Here, $\beta_i$ is a free parameter controlling the divided-difference approximation. The resulting method preserves convergence order 2p while avoiding explicit Jacobian evaluations.

### Numerical Example

Consider the nonlinear system

$$\begin{cases} 2\tan^{-1}(x+1) + y^2 - 3 = 0, \\ \tan^{-1}(x+1)y - 1 = 0, \end{cases}$$

The obtained results are summarized in Table 3.

**Table 3.** Results for the Jacobian-free scheme.

| Method | $\|x(k+1) - x(k)\|$ | $\|F(x^{(k+1)})\|$ | Iterations | ACOC |
|---|---|---|---|---|
| PS | $8.4954 \times 10^{-87}$ | $5.1034 \times 10^{-173}$ | 15 | 2.0 |
| JFS, $\beta = -0.1$ | $2.6927 \times 10^{-60}$ | $5.0 \times 10^{-120}$ | 10 | 1.9992 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| JFS, $\beta = 0.01$ | $1.1022 \times 10^{-93}$ | $8.6361 \times 10^{-187}$ | 13 | 2.0 |
| JFS, $\beta = -0.01$ | $4.0003 \times 10^{-81}$ | $1.1251 \times 10^{-161}$ | 13 | 2.0 |

The parameter $\beta$ influences both stability and convergence speed. Appropriate choices lead to competitive performance without requiring Jacobian evaluations.

## CONCLUSIONS

Simultaneous iterative schemes constitute an efficient alternative for computing multiple solutions of nonlinear equations and systems. The presented methodology provides:

a) simultaneous approximation of several roots,

b) increased convergence order with respect to the original scalar scheme,

c) extension to nonlinear vectorial problems,

d) Jacobian-free variants suitable for large-scale applications.

The numerical experiments demonstrate that the proposed methods achieve high accuracy with a reduced number of iterations.

Future research will focus on extending these techniques to singular nonlinear systems and problems with multiple roots. An interesting application of these methods is solving optimization problems without constraints.

## REFERENCES

[1] K. Weierstrass, (1903) “Neuer Beweis des Satzes, dass jede ganze rationale Function einer Ver¨ander- lichen dargestellt werden kann als ein Product aus linearen Functionen derselben Ver¨ander- lichen”, Gesammelte Werke, 3, 251–269.

[2] Durand, E. (1960) “Solutions Numériques des Equations Algébriques”, Masson, Paris, 1960.

[3] Kerner, I.O. (1966) “Ein Gesamtschrittverfahren zur Berechnung der Nullstellen von Polynomen”, Numerische Mathematik, 8, 290–294.

[4] Ehrlich, L. W. (1967) “A modified Newton method for polynomials”, Communications of the ACM, 10, 107–108.

[5] Cordero, A. Garrido, N., J.R. Torregrosa, and Triguero-Navarro, P. (2022) “Iterative schemes for finding all roots simultaneously of nonlinear equations”, Applied Mathematics Letters, 134.

[6] Chinesta, F. Cordero, A., Garrido, N., Torregrosa, J.R., and P. Triguero-Navarro, (2023) “Simultaneous roots for vectorial problems”, Computational and Applied Mathematics, 42, 227.

[7] Cordero, A., Garrido, N., J.R. Torregrosa, and Triguero-Navarro, P.(2025), “Jacobian-free vectorial iterative scheme to find several solutions simultaneously”, Mathematical Methods in the Applied Sciences, 48(5), 5718–5730.

# Clasificación de Señales Biométrica Mejorada Combinando Slope Entropy y Downsampling

**Moltó-Gallego, Vicent**[(1)]

*(1) Departamento de Informática de Sistema y Computadores, Universitat Politècnica de València, Campus d'Alcoi, 03801 Alcoy, España; vimolgal@epsa.upv.es*

## RESUMEN

Este trabajo analiza el impacto de distintas técnicas de downsampling (submuestreo) sobre el rendimiento de métodos de entropía aplicados a tareas de clasificación biomédica. En concreto, se estudia la combinación de Slope Entropy (SlpEn) con técnicas de submuestreo no uniforme (Trace Segmentation (TS)) y submuestreo uniforme (Uniform Downsampling (UDS)) utilizando los conocidos datasets de señales temporales biomédicas Bern-Barcelona EEG y Fantasia RR. Con motivos comparativos, también se hace uso de Permutation Entropy (PE). Los resultados muestran que la reducción controlada del número de muestras mejora notablemente la precisión de clasificación y reduce el tiempo computacional. En Bern-Barcelona, SlpEn aumenta su precisión de clasificación del 81% al 87% mediante UDS, mientras que PE mejora del 63% al 84%. En Fantasia RR, SlpEn alcanza hasta un 98% de precisión utilizando TS, lo que significa una mejora del 13%. En el caso de PE, la mejora es del 22%, llegando a alcanzar el 90% de precisión. Adicionalmente, se reduce el tiempo computacional entre un 30% y un 70% al submuestrear la serie temporal original al 50%, dependiendo de las características del dataset. Estos resultados sugieren que el downsampling permite reforzar patrones relevantes y reducir información redundante presente en señales biomédicas altamente muestreadas.

**Palabras clave:** Slope Entropy; Permutation Entropy; downsampling; submuestro; Trace Segmentation; clasificación de series temporales.

## INTRODUCCIÓN

La entropía constituye una herramienta ampliamente utilizada en el análisis de señales temporales [1], incluyendo las biomédicas [2], debido a su capacidad para cuantificar complejidad, regularidad y dinámica temporal. En las últimas décadas, múltiples medidas de entropía han sido propuestas para analizar señales fisiológicas complejas como EEG y ECG.

Entre los distintos métodos existentes, Slope Entropy (SlpEn) [3] ha demostrado resultados especialmente competitivos en tareas de clasificación biomédica gracias a su capacidad para combinar información simbólica y de amplitud. Sin embargo, el coste computacional asociado a la optimización de parámetros representa una limitación importante, especialmente cuando se utilizan señales con un elevado número de muestras.

Las señales biomédicas modernas suelen adquirirse a frecuencias de muestreo muy elevadas. Aunque esto permite preservar gran cantidad de información, también introduce redundancia y posibles componentes de ruido que pueden dificultar el proceso de clasificación. En este contexto, las técnicas de downsampling (submuestreo) permiten reducir el número de muestras manteniendo los patrones más relevantes de la señal.

El presente trabajo analiza el impacto de dos técnicas de downsampling [4], Trace Segmentation (TS), como técnica de submuestreo no uniforme que se centra en submuestrear las zonas con mayor variabilidad de las señales temporales, y Uniform Downsampling (UDS), como submuestreo uniforme, sobre el rendimiento de SlpEn y Permutation Entropy (PE) [5], utilizando esta segunda entropía para propósitos comparativos. El estudio se centra específicamente en los datasets Bern-Barcelona [6] y Fantasia RR [7], siendo ambos datasets ampliamente conocidos y de especial relevancia dentro de las señales temporales biomédicas.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar el impacto del downsampling sobre el rendimiento de métodos basados en entropía en tareas de clasificación biomédica.

De forma específica, se pretende analizar cómo las técnicas de submuestreo, como TS y UDS, afectan tanto a la precisión de clasificación como al tiempo computacional en los datasets biomédicos seleccionados, siendo estos Bern-Barcelona y Fantasia RR.

También se busca estudiar si la reducción del número de muestras permite eliminar información redundante manteniendo la capacidad discriminativa de las señales biomédicas, partiendo de la hipótesis en que, por lo general, las señales biomédicas se muestrean a una frecuencia considerablemente más alta de la que sería necesaria para obtener las características más relevantes para tareas de clasificación de las propias series [4].

Finalmente, se pretende comprobar si las mejoras observadas son exclusivas de SlpEn o si pueden extenderse a otros métodos de entropía como PE, así como si son dependientes del tipo de submuestreo.

## METODOLOGÍA

Los experimentos se realizaron aplicando inicialmente técnicas de downsampling sobre las señales originales y posteriormente calculando las medidas de entropía correspondientes sobre las señales temporales ya submuestreadas a distintos niveles.

Se utilizaron dos estrategias principales de reducción de muestras: Trace Segmentation (TS) y Uniform Downsampling (UDS). En ambos casos se evaluaron porcentajes de reducción comprendidos entre el 10% y el 70% de las muestras originales.

El dataset Bern-Barcelona está compuesto por señales EEG intracraneales muestreadas a 512 Hz, mientras que Fantasia RR contiene señales ECG muestreadas a 250 Hz. Ambos datasets fueron seleccionados debido a que presentan frecuencias de muestreo considerablemente superiores a las bandas frecuenciales relevantes para clasificación.

Posteriormente, se realizó una búsqueda exhaustiva de parámetros, comúnmente conocida como grid search, para optimizar SlpEn y PE. En SlpEn se exploraron distintos valores de los parámetros $m$ (entre 3 y 9, con paso de 1) y $\gamma$ (entre 0.1 y 1, con paso de 0.1), manteniendo $\delta$ en 0.001. En el caso de PE únicamente se optimizó $m$.

Finalmente, las características obtenidas mediante las distintas medidas de entropía fueron utilizadas en tareas de clasificación supervisada para evaluar el impacto de cada

técnica de downsampling. Para la obtención de la precisión de la clasificación, se hizo uso de la curva ROC.

La Figura 1 muestra un diagrama de flujo del experimento:

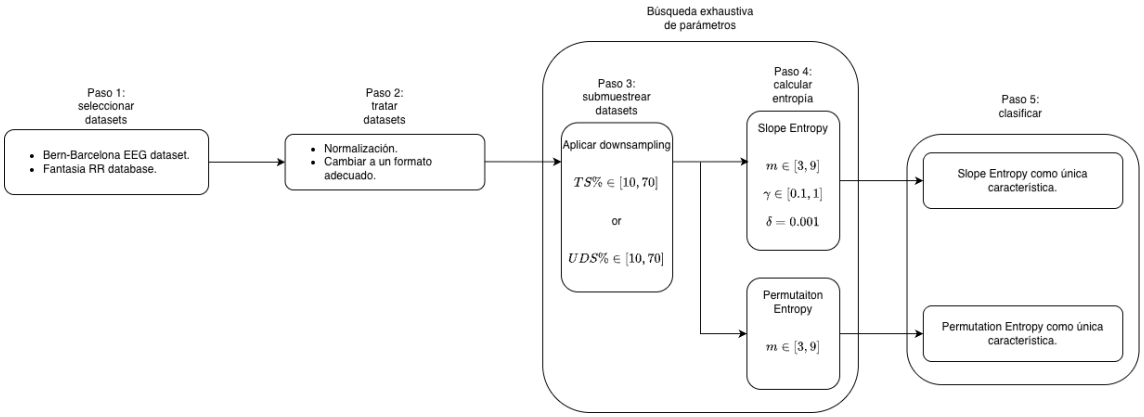



**Figura 1**. Diagrama de flujo que muestra cada uno de los pasos en que los experimentos se han dividido.

## RESULTADOS

Los resultados muestran mejoras significativas en ambos datasets cuando se aplican técnicas de downsampling. Las Tablas 1 y 2 muestran los resultados máximos obtenidos en términos de precisión en tareas de clasificación utilizando TS y UDS respectivamente.

**Tabla 1.** Precisión máxima obtenida en tareas de clasificación utilizando TS. Se reportan los resultados obtenidos sin utilizar TS para poder compararlos, así como la ganancia de precisión y el porcentaje de submuestreo utilizado para maximizar resultados.

| | *Dataset* | *Sin TS* | *Con TS* | *Mejora* | *TS%* |
|---|---|---|---|---|---|
| *SlpEn* | Bern-Barcelona | 81% | 85% | 4% | 13% |
| | Fantasia RR | 85% | 98% | 13% | 27% |
| *PE* | Bern-Barcelona | 63% | 81% | 18% | 10% |
| | Fantasia RR | 68% | 90% | 22% | 18% |

**Tabla 2.** Precisión máxima obtenida en tareas de clasificación utilizando UDS. Se reportan los resultados obtenidos sin utilizar UDS para poder compararlos, así como la ganancia de precisión y el porcentaje de submuestreo utilizado para maximizar resultados.

| *Dataset* | *Sin UDS* | *Con UDS* | *Mejora* | *UDS%* |
|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *SlpEn* | Bern-Barcelona | 81% | 87% | 6% | 11% |
| | Fantasia RR | 85% | 95% | 10% | 18% |
| *PE* | Bern-Barcelona | 63% | 84% | 21% | 18% |
| | Fantasia RR | 68% | 88% | 20% | 19% |

En Bern-Barcelona, SlpEn sin downsampling alcanza un 81% de precisión. Aplicando TS, la precisión aumenta hasta el 85%, utilizando únicamente el 13% de las muestras originales. Mediante UDS se obtiene el mejor resultado, alcanzando un 87% de precisión utilizando el 11% de las muestras.

En el caso de PE, Bern-Barcelona presenta mejoras todavía más destacadas. La precisión aumenta desde un 63% sin downsampling hasta un 81% utilizando TS y un 84% mediante UDS. Esto representa una mejora aproximada de 21 puntos porcentuales respecto al caso sin reducción de muestras.

En Fantasia RR también se observan mejoras importantes. SlpEn alcanza un 98% de precisión utilizando TS, frente al 85% obtenido sin downsampling. Con UDS se obtiene un 95%.

Por su parte, PE mejora desde un 68% hasta un 90% utilizando TS, confirmando que el beneficio del downsampling no es exclusivo de SlpEn. Con UDS, la mejora obtenida es ligeramente menor, consiguiendo un 88% de precisión utilizando solamente el 19% de las muestras.

La Figura 2 muestra las curvas de precisión máxima obtenidas para cada uno de los porcentajes de submuestreo, comparando las curvas de SlpEn y PE para cada dataset. El último punto de las curvas, 100%, hace referencia al caso en que no se utiliza ningún submuestreo, o lo que es lo mismo, se utiliza la señal temporal con todas sus muestras.

Los resultados apoyan la hipótesis de que gran parte de la información presente en señales biomédicas altamente muestreadas es redundante para tareas de clasificación. El downsampling permite reforzar patrones relevantes y reducir componentes innecesarios de la señal.

Además de mejorar la precisión, el downsampling reduce significativamente el tiempo computacional, especialmente durante la optimización de parámetros. La reducción del número de muestras permite acelerar considerablemente el cálculo de las medidas de entropía. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos en cuanto a ahorro de tiempo computacional para varios porcentajes de submuestreo.

**Tabla 3.** Tiempo reportado en segundos para cada dataset para diferentes porcentajes de submuestreo, tanto para TS como para UDS. Los valores corresponden a la totalidad de la búsqueda exhaustiva de *m* y *γ* para SlpEn, y *m* para PE.

| *Dataset* | *100%* | *70% (TS/UDS)* | *50% (TS/UDS)* | *25% (TS/UDS)* | *10% (TS/UDS)* |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *SlpEn* | Bern-Barcelona | 180.09 | 152.68/ 234.09 | 126.87/ 212.44 | 79.82/ 121.37 | 34.37/ 38.74 |
| | Fantasia RR | 336.00 | 207.14/ 223.51 | 127.60/ 131.98 | 43.29/ 47.00 | 9.29/ 9.85 |
| *PE* | Bern-Barcelona | 49.65 | 35.33/ 50.03 | 25.79/ 40.62 | 13.49/ 17.54 | 4.94/ 5.08 |
| | Fantasia RR | 47.70 | 29.61/ 29.82 | 17.73/ 17.67 | 5.78/ 5.72 | 1.37/ 1.36 |

Nótese que el tiempo empleado en la optimización de parámetros de SlpEn es muy superior al utilizado con PE. La razón detrás de esto es simplemente que la búsqueda exhaustiva para SlpEn es mucho mayor debido a que esta tiene dos parámetros, en comparación a un único parámetro en el caso de PE.

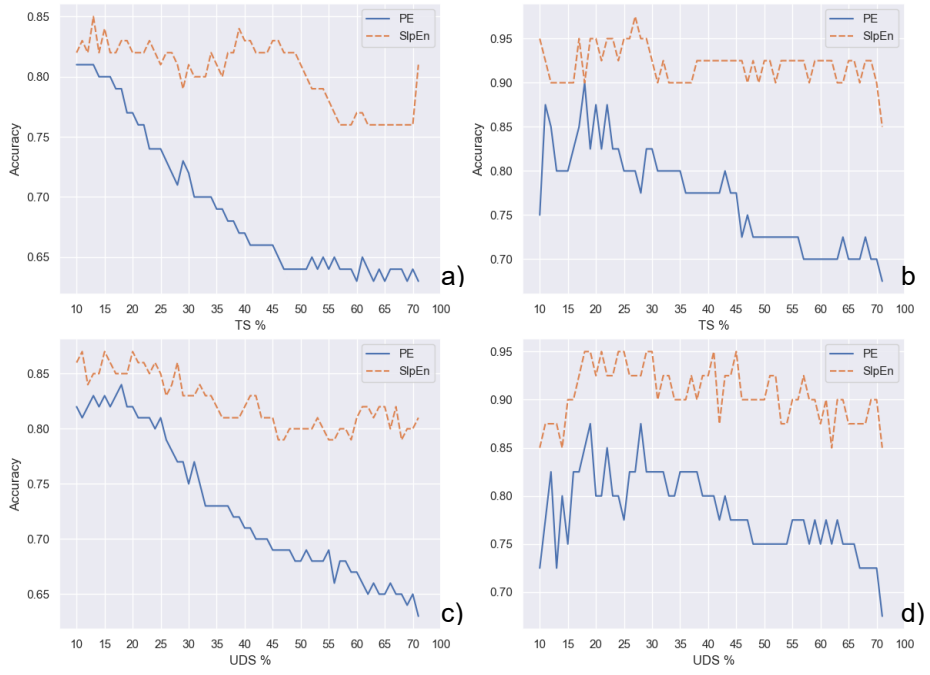



**Figura 2**. Comparación de la precisión de para cada TS% y UDS%. El último punto (100) corresponde a cuando no hay downsampling. Cada gráfica corresponde a cada uno de los datasets: a) Bern-Barcelona EEG (TS), b) Fantasia RR (TS), c) Bern-Barcelona EEG (UDS), d) Fantasia RR (TS).

## CONCLUSIONES

Las mejoras observadas en Bern-Barcelona y Fantasia RR parecen estar directamente relacionadas con las elevadas frecuencias de muestreo de ambos datasets. En señales donde la frecuencia de adquisición es muy superior a las bandas relevantes para clasificación, el downsampling permite reducir ruido y redundancia preservando la información discriminativa.

Los resultados indican además que los porcentajes de reducción más efectivos suelen situarse entre el 10% y el 30% de las muestras originales. Esto sugiere que una parte

considerable de la información presente en las señales originales no resulta esencial para tareas de clasificación basadas en entropía.

Otro aspecto importante es que las mejoras no se limitan a SlpEn. PE también presenta incrementos muy significativos de precisión, especialmente en Bern-Barcelona. Esto abre la posibilidad de aplicar estrategias similares a otros métodos de análisis de complejidad y entropía.

Desde el punto de vista computacional, la reducción de tiempos resulta especialmente relevante en procesos de optimización mediante búsqueda exhaustiva de parámetros. Reducir el coste computacional facilita la aplicación práctica de estos métodos en contextos clínicos y sistemas de monitorización biomédica, especialmente en aplicaciones en tiempo real.

Además, como se puede comprobar en la Figura 2, en gran parte de los porcentajes de submuestro probados, la precisión en tareas de clasificación es superior a la precisión obtenida al utilizar la totalidad de las muestras, lo que permitiría obtener mejores resultados en la gran mayoría de los casos donde se elige un porcentaje de submuestreo de forma arbitraria, sin la necesidad de probar una gran cantidad de porcentajes.

Como líneas futuras de investigación, se propone estudiar cada una de las bandas de frecuencia de datasets que contengan señales biomédicas, de forma que se pueda realizar un submuestreo más preciso que se centre en las bandas más relevantes en tareas de clasificación.

## REFERENCIAS

[1] Jiang, W.; Shan, Y.; Xue, X.; Ma, J.; Chen, Z.; Zhang, N. Fault Diagnosis for Rolling Bearing of Combine Harvester Based on Composite-Scale-Variable Dispersion Entropy and Self-Optimization Variational Mode Decomposition Algorithm. Entropy 2023, 25, 1111. https://doi.org/10.3390/e25081111.

[2] Chen, W.; Wang, Y.; Ren, Y.; Jiang, H.; Du, G.; Zhang, J.; Li, J. An automated detection of epileptic seizures EEG using CNN classifier based on feature fusion with high accuracy. BMC Med. Inform. Decis. Mak. 2023, 23, 96. https://doi.org/10.1186/s12911-023-02180-w.

[3] Cuesta-Frau, D. Slope Entropy: A New Time Series Complexity Estimator Based on Both Symbolic Patterns and Amplitude Information. Entropy 2019, 21, 1167. https://doi.org/10.3390/e21121167.

[4] Moltó-Gallego, V.; Cuesta-Frau, D.; Kouka, M. Enhancing Classification Results of Slope Entropy Using Downsampling Schemes. Axioms 2025, 14, 797. https://doi.org/10.3390/axioms14110797.

[5] Bandt, C.; Pompe, B. Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series. Phys. Rev. Lett. 2002, 88, 174102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174102.

[6] Andrzejak, R.G.; Schindler, K.; Rummel, C. Nonrandomness, nonlinear dependence, and nonstationarity of electroencephalo-graphic recordings from epilepsy patients. Phys. Rev. E 2012, 86, 046206. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.046206.

[7] Iyengar, N.; Peng, C.; Morin, R.; Goldberger, A.L.; Lipsitz, L.A. Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics. Am. J.-Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol. 1996, 271, R1078–R1084. https://doi.org/10.1152/ajpregu.1996.271.4.R1078.

# Estrategias y aplicaciones prácticas de 'prompting' en la comunicación de campus universitarios periféricos

**Mengual, José[(1)], Lledó, Rubén [(2)], Lara, Ignacio[(3)]**
*(1) Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, jomenva@upv.es*
*(2) Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, prensa@epsa.upv.es*
*(3) DIRCOM Área de Comunicación, UPV Campus Alcoy, comunicacion@epsa.upv.es*

## RESUMEN

El presente trabajo analiza el impacto del 'prompting' como herramienta estratégica para optimizar la comunicación institucional en campus universitarios periféricos. Estos centros suelen enfrentar desafíos específicos de visibilidad y conexión con su entorno social que pueden ser mitigados mediante el uso de Inteligencia Artificial Generativa. A través de un análisis de diversas técnicas de interacción con modelos de lenguaje de gran tamaño, se proponen soluciones basadas en cuatro patrones fundamentales: Crear, Razonar, Transformar y Analizar. Además, destaca la importancia de la 'regla null' para evitar alucinaciones en el análisis de datos y el modelo 'Human in the Loop' como garante de la veracidad institucional y ética.

Los resultados sugieren que la implementación de flujos de trabajo profesionales reduce significativamente los tiempos de producción en notas de prensa, boletines y contenidos para redes sociales, manteniendo una alta coherencia de marca y precisión informativa. También mejoran las decisiones en gestión de eventos, gestión de proveedores tecnológicos y otras acciones del día a día. Estas técnicas también las pueden aplicar investigadores de campus universitarios más reducidos que no tengan Oficinas o Áreas de Comunicación en sus centros.

**Palabras clave:** Inteligencia Artificial, Prompting, Comunicación Universitaria, Campus periféricos, IA, Regla Null, Human in the Loop, Estrategia Digital

## INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial Generativa ha dejado de ser una promesa tecnológica para convertirse en un motor de transformación en la gestión universitaria [1]. Los campus periféricos, situados fuera de los núcleos metropolitanos principales, enfrentan a menudo una 'brecha de visibilidad' debido a recursos limitados en sus departamentos de comunicación. En este contexto, la ingeniería de prompts (o prompting) no se define simplemente como el acto de escribir comandos, sino como el diseño estructural de instrucciones que permiten a los modelos de lenguaje actuar como colaboradores estratégicos [2].

El prompt es una unidad de entrada compuesta por lenguaje natural o código que actúa como el estímulo inicial para que un modelo de lenguaje generativo procese información y produzca una salida (output) alineada con la intención del usuario. Por tanto, el prompting, es la técnica: es el proceso estratégico de diseñar, redactar y refinar esas instrucciones para maximizar la calidad y precisión de la respuesta de la IA.

Técnicamente, un modelo de lenguaje funciona mediante la predicción probabilística de la siguiente unidad mínima de texto. El modelo no posee una comprensión holística del mundo, sino que replica patrones estadísticos extraídos de miles de millones de textos. Por ello, la calidad del 'output' depende directamente de la arquitectura del 'input'. En campus satélites (periféricos), la IA puede democratizar la capacidad de generar

contenidos de alta calidad, permitiendo que una estructura administrativa reducida gestione flujos de información multicanal de manera eficiente.

Sin embargo, el uso profesional de estas herramientas conlleva desafíos éticos y técnicos. Las alucinaciones —la tendencia del modelo a inventar hechos con apariencia de veracidad— y los sesgos algorítmicos representan riesgos para la reputación institucional. Por tanto, es fundamental integrar conceptos como el 'Human in the Loop' (humano en el ciclo de decisión y resultado final) para validar cada mensaje antes de su difusión pública final [3].

## OBJETIVOS

Esta comunicación tiene como propósito principal sistematizar el uso de la IA en la comunicación de campus periféricos. Los objetivos específicos incluyen:

1. Identificar y aplicar fácilmente cuatro patrones fundamentales de prompting (Crear, Razonar, Transformar, Analizar) a las tareas habituales de un gabinete de prensa universitario.
2. Desarrollar los ‘metaprompts’ o diagnóstico de ‘prompts’ a través de rúbricas
3. Implementar la 'regla null' como mecanismo técnico para prevenir alucinaciones [4] en la extracción de datos de memorias de investigación.
4. Establecer un marco de validación humana que asegure la alineación del contenido generado con los valores y la identidad del campus objeto de estudio.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS – 4 PATRONES FUNDAMENTALES DE ‘PROMPTING’ EN LA COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA

### A. Patrón CREAR: Control preciso de la identidad

Esencial para discursos, editoriales o comunicados oficiales donde el tono debe ser impecable. Este patrón utiliza estructuras como RICO (Rol-Instruction-Context-Output) o CO-STAR (Context-Objective.Style-Tone-Audience-Response) y se apoya en el **aprendizaje por contraste**. No basta con pedir un tono "formal"; hay que definir qué es correcto y qué es incorrecto para nuestra facultad.

- **Aplicación:** Discursos del equipo directivo, mensajes de bienvenida, manifiestos institucionales, etc
- **Modelo de Prompt:**

*"Actúa como Director de Comunicación. Contexto: Aniversario de la Facultad. Tarea: Redacta un mensaje para la comunidad.* ***Regla de Oro: Usa contraste de tono. Correcto:*** *Inspirador y formal (ej. 'Nuestra trayectoria es el cimiento del futuro').* ***Incorrecto:*** *Burocrático o frío (ej. 'Se procede a la celebración según el calendario'). Formato: 250 palabras."*

### B. Patrón RAZONAR: aplicar porcentajes y ponderaciones para la toma de decisiones

Utilizado para la toma de decisiones complejas, como evaluar propuestas de eventos, convenios de colaboración o elegir proveedores tecnológicos para el campus. Aquí la IA no redacta, sino que audita bajo criterios objetivos.

- **Modelo de Prompt:**

*"Actúa como Evaluador de Proyectos. Tarea: Evalúa las propuestas para el evento [OBJETIVO] según estos pesos: Coste (40%), Impacto en alumnos (30%), Innovación (30%). **Auditoría:** Justifica cada puntuación (1 al 5) según los criterios y calcula la media ponderada.*

*Propuestas: [PEGAR AQUÍ]"*

**C. Patrón TRANSFORMAR: transforma lenguaje científico a un contexto más comprensible**

Es el patrón más seguro para la comunicación científica y técnica. Optimiza un documento existente (un paper o una memoria) sin "inventar" contenido nuevo, evitando alucinaciones informativas.

- **Aplicación:** Adaptar un artículo científico a una nota de prensa o mejorar la claridad de un reglamento interno, como por ejemplo la extensa Guía de Comunicación de la UPV. Este es uno de los más utilizados por investigadores que no poseen conocimientos sobre comunicación.
- **Modelo de Prompt:**

*"Actúa como Editor Académico. Tareas sobre el texto adjunto:*

1. ***Marcar:** Identifica 3 problemas de claridad o tono.*
2. ***Proponer:** Sugiere una mejora específica para cada uno.*
3. ***Generar:** Crea la versión final optimizada.*

*Borrador: [PEGAR TEXTO AQUÍ]"*

**D. Patrón ANALIZAR: Extracción y la "Regla Null"**

Permite convertir memorias institucionales densas en datos accionables para redes sociales o prensa, protegiendo la veracidad mediante restricciones técnicas.

- **Aplicación:** Resúmenes de memorias anuales, extracción de hitos para copys en redes sociales, etc
- **Modelo de Prompt:**

*"Actúa como Analista Institucional. Extrae la información en tres capas: Capa 1: Una línea para dirección.*

*Capa 2: 5 puntos clave para prensa.*

*Capa 3: Párrafo contextual para la web.*

***Regla Null:** Si un dato no aparece explícitamente en el texto, responde 'null'; no rellenes datos faltantes.*

*Documento: [PEGAR AQUÍ]"*

**Diferencias entre los patrones 'Transformar' y 'Analizar'**

El patrón **Transformar** funciona como un traductor: adapta el lenguaje científico para que sea comprensible por cualquier audiencia sin perder rigor. En contraste, el patrón

**Analizar** actúa como un filtro: extrae únicamente datos y cifras clave para convertirlos en información directa. Mientras uno se enfoca en mejorar la claridad del mensaje, el otro se especializa en la precisión de la extracción, garantizando que no se inventen datos inexistentes.

## METODOLOGÍA Y RESULTADOS - METAPROMPTS: EL DIAGNÓSTICO POR RÚBRICA

Un metaprompt es un "prompt que evalúa a otro prompt". En la comunicación universitaria, funciona como una revisión de calidad antes de ejecutar una tarea importante. La opción más adecuada es evaluar el prompt que has generado utilizando uno de los patrones anteriores. Tras la evaluación con el metaprompt, será la opción más óptima para utilizar como 'input'. El diagnóstico incorpora una rúbrica de 5 criterios:

1. **Claridad del Rol:** ¿Sabe la IA quién debe ser?
2. **Contexto Institucional:** ¿Entiende la situación y la audiencia?
3. **Restricciones de Seguridad:** ¿Sabe qué NO debe hacer?
4. **Estructura del Output:** ¿Está definido el formato y la extensión?
5. **Criterios de Calidad:** ¿Se han incluido ejemplos de tono o pesos porcentuales?

Mientras que la ingeniería de prompts tradicional se centra en la instrucción directa, el **metaprompting** representa un nivel superior de abstracción donde la IA genera, refina o coordina sus propios procesos de razonamiento [6].

**Herramienta de Diagnóstico (Metaprompt para copiar):**

*"Actúa como experto en Ingeniería de Prompts. Evalúa el [PROMPT] que te daré bajo la rúbrica de 5 criterios (Rol, Contexto, Restricciones, Formato y Criterios Pro).* ***Tu tarea:*** *> 1. Asigna una puntuación del 1 al 5 a cada criterio. 2. Diagnostica posibles fallos (riesgo de alucinación o tono genérico). 3. Redacta la* ***Versión v2*** *del prompt, ya corregida y lista para usar.*

Estos son los criterios concretamente:

1. **Claridad del Rol:** ¿Sabe la IA quién debe ser?
2. **Contexto Institucional:** ¿Entiende la situación y la audiencia?
3. **Restricciones de Seguridad:** ¿Sabe qué NO debe hacer?
4. **Estructura del Output:** ¿Está definido el formato y la extensión?
5. **Criterios de Calidad:** ¿Se han incluido ejemplos de tono o pesos porcentuales?"

*[PROMPT A EVALUAR]:*

*[PEGAR TU PROMPT A EVALUAR SURGIDO DE LOS PATRONES ANTERIORES AQUÍ]"*

## APLICACIONES Y PROTOCOLOS DE CALIDAD

La redacción de notas de prensa se beneficia de la capacidad multimodal de los modelos actuales, permitiendo analizar PDFs y capturas de pantalla simultáneamente. Al hacerlo,

es vital aplicar la '**Regla Null**': instruir explícitamente a la IA para que escriba 'null' si la información no figura en la fuente.

En la elaboración de '*copys*' para redes sociales, el enfoque debe ser la micro-segmentación, adaptando el tono y el formato a la audiencia específica. El concepto **Human in the Loop (HITL)** establece que el flujo profesional termina siempre con una validación humana sistemática antes de la entrega final.

## EL INVESTIGADOR COMO DIVULGADOR

Aunque los patrones de prompting descritos se han enfocado principalmente en sistematizar el uso de la IA en la comunicación corporativa de los campus periféricos, su aplicación es directamente extrapolable y enormemente valiosa para la labor del personal docente e investigador.

A menudo, la transferencia de conocimiento se enfrenta a una barrera significativa: la dificultad de traducir el lenguaje científico, caracterizado por su alto rigor y tecnicismo, a un contexto más comprensible y atractivo para la sociedad en general o los medios de comunicación.

En este sentido, el patrón **Transformar** resulta una herramienta estratégica fundamental para los investigadores. Este modelo optimiza un documento existente, como un artículo publicado o un póster académico, sin "inventar" contenido nuevo. Evita el riesgo de alucinaciones al adaptar un paper científico a una nota de prensa accesible para el público general. Por su parte, el patrón **Analizar** actúa como un filtro eficaz y preciso. Permite a los investigadores extraer únicamente aquellos datos, estadísticas y cifras clave de investigaciones densas o memorias extensas, para convertirlos de forma ágil en información directa, ideal para nutrir argumentarios de entrevistas o crear contenido divulgativo en redes sociales.

Para el científico, proteger la exactitud metodológica de sus hallazgos es una premisa absolutamente innegociable. Aquí resulta vital la aplicación rigurosa de la **Regla Null**, instruyendo explícitamente a la IA para que no rellene datos faltantes ni suponga resultados si la información no figura literalmente en la fuente original de datos. Además, con la adopción ineludible del concepto **Human in the Loop (HITL)**, el investigador mantiene el control absoluto de todo el proceso de divulgación. Este modelo ético asegura que el flujo de trabajo termine siempre con una validación humana sistemática, garantizando la total precisión técnica antes de su difusión pública final.

## CONCLUSIONES

El prompting representa una oportunidad sin precedentes para nivelar el campo de juego de los campus universitarios periféricos. Al sistematizar el uso de la IA mediante patrones estructurados, metaprompts y protocolos como la ‘regla null’, estos centros pueden multiplicar su impacto comunicativo sin comprometer la integridad de la información.

La implementación de estos flujos profesionales reduce drásticamente los tiempos de producción, pero exige el modelo **Human in the Loop (HITL)**. Ninguna salida de la IA debe publicarse sin la validación de un profesional que verifique la alineación con los valores del campus.

## REFERENCIAS

[1] Bond, M.; Marín, V. I.; Dolch, C.; Bedenlier, S.; Zawacki-Richter, O. (2024). "Digital transformation in higher education: A systematic review". Journal of Computing in Higher Education, v. 36, n. 1, p.p. 1-35. http://dx.doi.org/10.1007/s10639-023-11916-6

[2] Liu, P.; Yuan, W.; Fu, J.; Jiang, Z.; Hayashi, H.; Neubig, G. (2023). "Pre-train, Prompt, and Predict: A Systematic Survey of Prompting Methods in Natural Language Processing". ACM Computing Surveys, v. 55, n. 9, p.p. 1-35. http://dx.doi.org/10.1145/3560815

[3] Monarch, Robert Munro (2021). "Human-in-the-Loop Machine Learning". Human-in-the-Loop Machine Learning. Lugar de publicación: Shelter Island .Editado por: Manning Publications, p.p. 1-400. ISBN: 978 1 61729 674 1

[4] Ji, Z.; Lee, N.; Frieske, R.; Savoldi, B.; et al. (2023). "Survey of Hallucination in Natural Language Generation". ACM Computing Surveys, v. 55, n. 12, p.p. 1-38. http://dx.doi.org/10.1145/3571730

[5] UNESCO. Guidance for generative AI in education and research. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693

[6] Suzgun, M.; Kalai, A. T. Meta-prompting: Enhancing language models with task-agnostic scaffolding. https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.12954

# Del bagazo cervecero a materiales circulares: planta piloto para la valorización secuencial dentro del proyecto CIRCSYST

**Vicente-Vinas, María del Puig[(1)*]; Montañés, Néstor[(1)]; Miranda-Pinzon, Mario[(1)]; Quiles-Carrillo, Luis[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, Alicante. *Email: mavivia@upv.edu.es*

## RESUMEN

El proyecto europeo CIRCSYST plantea soluciones circulares para residuos plásticos, envases, biorresiduos y agua. Dentro del Demostrador 6, la Universitat Politècnica de València (UPV) aborda la valorización del bagazo cervecero o *Brewer's Spent Grain* (BSG), un subproducto lignocelulósico de la industria cervecera con contenido relevante en fibra, proteínas, hemicelulosas y compuestos fenólicos. Esta comunicación presenta el diseño, montaje y puesta en marcha de una planta piloto a escala de laboratorio en el Campus de Alcoy, concebida para optimizar la extracción secuencial de fracciones de valor añadido y generar conocimiento transferible a una instalación semiindustrial. La estrategia combina disolventes de bajo impacto, control de pH y temperatura, operaciones de separación y metodologías de diseño de experimentos para maximizar la recuperación de polifenoles, proteínas, arabinoxilanos y fibra celulósica. Los primeros ensayos han permitido ajustar condiciones de procesado, confirmar la operatividad de la instalación y orientar la incorporación de fibras de BSG en matrices poliméricas recicladas para aplicaciones industriales como mobiliario y pallets.

**Palabras clave:** CIRCSYST; bagazo cervecero; biorrefinería; planta piloto; polímeros reciclados; economía circular.

## INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos productivos circulares exige ir más allá de la gestión convencional de residuos y avanzar hacia procesos capaces de convertir corrientes secundarias en materias primas funcionales. En la industria cervecera, el bagazo cervecero constituye el principal subproducto sólido y presenta una matriz compleja formada por polisacáridos, proteínas, lignina, lípidos, cenizas y compuestos fenólicos [2]. Esta composición lo convierte en un candidato especialmente atractivo para esquemas de biorrefinería, siempre que el proceso permita recuperar distintas fracciones de forma ordenada, eficiente y con bajo impacto ambiental.

En este marco, CIRCSYST (*Circular Systemic Solutions for Plastic, Packaging, Bio-Waste, and Water*), demuestra soluciones circulares en cadenas de valor reales. El Demostrador 6 se centra en la industria cervecera circular y propone reutilizar el bagazo como fuente de sustancias de alto valor añadido y como carga o refuerzo en matrices plásticas recicladas. La contribución de la UPV se sitúa en la escala de laboratorio, donde se ha diseñado una planta piloto que permite estudiar el proceso con suficiente control técnico antes de transferirlo a escalas superiores.



**Figura 1**. Planta piloto de laboratorio instalada en el Campus de Alcoy de la UPV.

## OBJETIVOS

El objetivo general de esta comunicación es presentar una ruta de valorización secuencial del BSG que permita obtener fracciones funcionales y, al mismo tiempo, generar información técnica útil para transferir el proceso a una planta semiindustrial. El enfoque se apoya en metodologías de extracción sostenibles aplicadas a compuestos fenólicos [6] y en herramientas de diseño experimental para reducir ensayos y seleccionar condiciones óptimas [4]. Para alcanzar este objetivo se han planteado las siguientes metas específicas:

- Diseñar e instalar una planta piloto de laboratorio capaz de operar con BSG húmedo, minimizando etapas de secado previo y favoreciendo la escalabilidad industrial.
- Optimizar la extracción de polifenoles, proteínas, arabinoxilanos y fibra celulósica mediante control de pH, temperatura, tiempo de extracción y relación sólido/líquido.
- Definir métodos de caracterización que permitan cuantificar las fracciones obtenidas y evaluar su estabilidad, composición y potencial de aplicación.
- Validar preliminarmente el uso de fibras derivadas del BSG como carga en polímeros reciclados empleados en productos industriales.

## METODOLOGÍA

### Diseño de la planta piloto de laboratorio

El diseño de la planta partió de un diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), posteriormente adaptado a las condiciones reales de instalación en el Campus de Alcoy. La planta integra un molino de discos para acondicionar el bagazo húmedo, un reactor de hidrólisis de 10 L con camisa de acero inoxidable, sistemas de prefiltro y filtración de 250 y 100 µm, tanque de precipitación, bombas de vacío y recirculación, control de pH, baños de calefacción y refrigeración, centrífuga tubular y equipo de *spray-drying*. Esta configuración reproduce, a escala de laboratorio, las operaciones necesarias para extraer, separar, concentrar y secar las fracciones obtenidas.

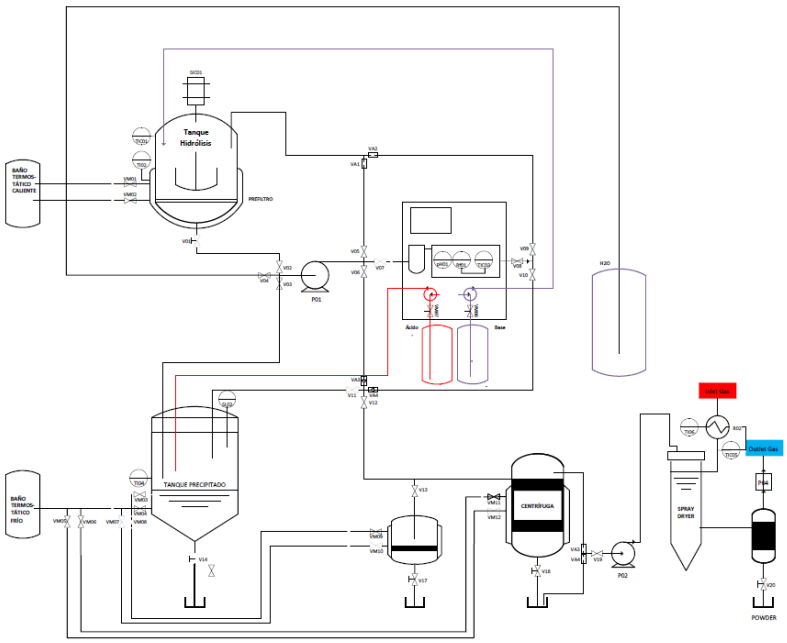



**Figura 2**. P&ID final de la planta piloto de laboratorio de la UPV.

## Estrategia de extracción secuencial

La metodología se ha concebido como un proceso consecutivo aplicado a la misma materia prima. La secuencia comienza con la extracción de compuestos fenólicos y continúa con la recuperación de proteínas, hemicelulosas y fibra. Aunque la literatura suele recomendar secado y molienda para incrementar el área de contacto [5], en este trabajo se ha priorizado el uso de BSG húmedo para aproximar el proceso a condiciones industriales y reducir el consumo energético asociado al acondicionamiento previo. La extracción de proteínas se evaluará mediante rutas alcalinas y enzimáticas, considerando estrategias recientes de pretratamiento alcalino a presión reducida [3] y la posible generación de fracciones proteicas con actividad funcional [1].

**Tabla 1.** Estrategia secuencial propuesta para la valorización del bagazo cervecero en la planta piloto de laboratorio.

| Etapa | Operación | Condiciones de trabajo | Producto objetivo |
|---|---|---|---|
| 1 | Extracción de polifenoles | Agua como disolvente, pH ácido, 40–70 °C y 20–60 min; optimización mediante diseño experimental. | Fracción rica en polifenoles y extractos con actividad antioxidante. |
| 2 | Extracción de proteínas | Tratamiento alcalino químico o enzimático con Alcalase; posterior enfriamiento, precipitación/filtración y concentración. | Fracción rica en proteínas o hidrolizado proteico. |
| 3 | Recuperación de arabinoxilanos/lignina | Extracción alcalina adicional si la fracción obtenida en la etapa proteica no es suficiente. | Fracción rica en hemicelulosas y lignina soluble. |
| 4 | Recuperación de fibra | Retención de la fracción sólida en reactor, lavado y secado a 60 °C hasta peso constante. | Fracción celulósica para formulaciones poliméricas. |

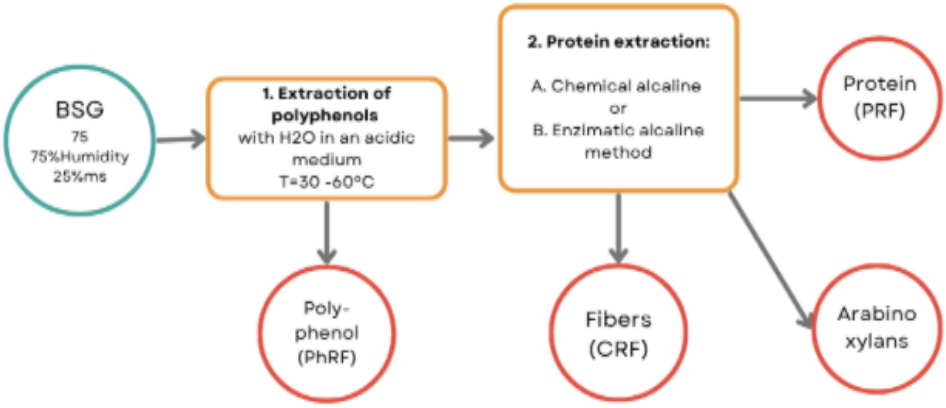



**Figura 3.** Diagrama de flujo de la extracción consecutiva de fracciones de valor a partir de BSG.

### Caracterización de materias primas y fracciones

La caracterización inicial del BSG se realiza mediante determinación de materia seca y cenizas según metodología AOAC, granulometría por difracción láser, contenido de polifenoles totales, capacidad antioxidante y determinación de nitrógeno Kjeldahl para estimar proteína. De forma complementaria, se emplean FTIR, SEM, TGA y DSC para relacionar la composición, morfología y estabilidad térmica de las fracciones con su posible incorporación en matrices poliméricas.

### Control de proceso y criterios de escalado

Una planta piloto no solo debe reproducir una secuencia química, sino también garantizar que las condiciones de operación puedan repetirse y registrarse. Por ello, se han identificado las señales de entrada y salida necesarias para el control de la instalación, incluyendo temperatura, presión, pH, conductividad, nivel de líquido, caudales de transferencia y estado de bombas o actuadores. Esta información se está utilizando para estructurar diagramas GRAFCET de los subprocesos de extracción de polifenoles y proteínas, con el fin de asegurar una operación reproducible, trazable y segura.

La transferencia a escala semiindustrial requiere conservar la lógica del proceso, pero ajustando volúmenes, tiempos de residencia, relación sólido/líquido, eficiencia de mezcla y consumo energético por unidad de volumen. Por ello, los ensayos en la planta de la UPV no se plantean únicamente como pruebas de extracción, sino como una etapa intermedia para generar criterios de escalado. La información obtenida permitirá comparar el comportamiento de la instalación de laboratorio con la futura planta en L. Pernía y reducir incertidumbres antes de operar con mayores cantidades de bagazo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estado de la planta piloto

La planta piloto de laboratorio de la UPV se encuentra instalada y operativa. Durante su desarrollo se han adquirido o adaptado los componentes principales, se han definido las conexiones de proceso y se han iniciado los ensayos de ajuste de métodos analíticos y de extracción. La instalación permite reproducir las etapas críticas del proceso y obtener

parámetros de operación transferibles a la planta semiindustrial prevista en las instalaciones de L. Pernía, en Chiloeches (Guadalajara).

El montaje ha permitido comprobar la compatibilidad entre los equipos auxiliares y la secuencia de proceso prevista. El reactor de hidrólisis actúa como unidad central para las etapas de extracción, mientras que la filtración, centrifugación y precipitación permiten separar progresivamente las fracciones líquidas y sólidas. El control térmico mediante circuitos de calefacción y refrigeración resulta especialmente relevante para proteger compuestos termosensibles, favorecer la precipitación de fracciones proteicas y estabilizar extractos antes del secado.

Uno de los aspectos diferenciales del diseño es la retención de la fracción rica en celulosa dentro del reactor mediante un prefiltro de 250 µm. La granulometría de una muestra recibida en octubre de 2025 mostró que la mayor parte de las partículas se situaba entre 0,5 y 2,1 mm, con un Dv50 de 1,06 mm. Este resultado permitió ajustar el sistema de filtración y mejorar la recuperación de fibra sin obstruir el flujo de proceso.

**Resultados de caracterización y aplicación en polímeros**

La muestra CIRCSYST_6_20251006_BSG presentó un contenido de materia seca del 25,9% y un contenido de cenizas del 2,76%. En paralelo, AIJU ha caracterizado fibras y muestras de bagazo mediante IR-ATR, TGA y SEM para evaluar su comportamiento en formulaciones poliméricas. Los ensayos termogravimétricos mostraron humedades residuales próximas al 5-6% y temperaturas de inicio de degradación en torno a 252-267 °C, lo que indica la necesidad de secar adecuadamente las fibras y evitar temperaturas de procesado superiores a 250 °C.

Las primeras formulaciones con 25% de BSG en matrices de PE y PP reciclado muestran un incremento de rigidez, coherente con el papel de la fibra como carga lignocelulósica. Sin embargo, también se observa una disminución de las propiedades de impacto, incluso en presencia de compatibilizante. Este resultado no invalida la estrategia, sino que orienta el siguiente paso: emplear la fracción celulósica obtenida en la planta piloto de la UPV, más limpia de proteínas y otros componentes, y estudiar compatibilizantes o aditivos alternativos.

**Impacto circular y próximos pasos**

El enfoque propuesto permite valorizar una misma corriente residual en varios productos intermedios. La fracción rica en polifenoles puede dirigirse a aplicaciones donde sea relevante la actividad antioxidante; la fracción proteica puede evaluarse por su composición y funcionalidad; los arabinoxilanos y la lignina abren rutas hacia materiales funcionales; y la fibra celulósica constituye una alternativa de refuerzo para polímeros reciclados. Esta integración aumenta el aprovechamiento del BSG y evita que el proceso dependa de una única vía de valorización.

Los próximos trabajos se centrarán en completar la optimización mediante metodología de superficie de respuesta, cuantificar rendimientos de cada fracción, evaluar la reutilización de agua o reactivos cuando sea viable y consolidar balances de materia y energía. Estos datos serán necesarios para el análisis de ciclo de vida del Demostrador 6 y para comparar la valorización propuesta con usos convencionales del bagazo, como alimentación animal o gestión de bajo valor añadido.

## CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado por la UPV en CIRCSYST ha permitido disponer de una planta piloto de laboratorio operativa para estudiar la valorización secuencial del bagazo cervecero. La instalación integra operaciones de extracción, filtración, centrifugación, control térmico, control de pH y secado, y constituye una herramienta clave para optimizar la recuperación de polifenoles, proteínas, arabinoxilanos y fibras.

Los resultados preliminares confirman la viabilidad técnica del enfoque y aportan criterios relevantes para el escalado: uso de BSG húmedo, definición de mallas de filtración, control de humedad de las fibras, límite térmico de procesado y necesidad de ajustar la compatibilización en matrices recicladas. En conjunto, el Demostrador 6 avanza hacia una biorrefinería circular capaz de conectar la industria cervecera con nuevas aplicaciones en plásticos reciclados para mobiliario y pallets.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación se llevó a cabo en el marco del proyecto CircSyst, financiado por la Unión Europea dentro del Programa de Investigación e Innovación Horizonte Europa, en virtud del Acuerdo de Subvención n.º 101135505. M. Miranda-Pinzón agradece al Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València (UPV) la financiación de un contrato predoctoral en el marco del programa PAID-01-24.

## REFERENCIAS

[1] Abeynayake, Ranithri; Zhang, Sitian; *et al.* (2022). "Development of antioxidant peptides from brewers' spent grain proteins". *Lwt, v.158*, p.p. 113162.

[2] Belardi, Ilary; De Francesco, Giovanni; *et al.* (2025). "Advances in the valorization of brewing by-products". *Food Chemistry, v.465*, p.p. 141882.

[3] da Fonseca, Yasmim Arantes; Gurgel, Leandro; *et al*. (2023). "Reduced-pressure alkaline pretreatment as an innovative and sustainable technology to extract protein from brewer's spent grain". *Journal of Cleaner Production, v.416*, p.p. 137966.

[4] Ferreira, SL Costa; Bruns, RE; *et al.* (2007). "Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods". *Analytica chimica acta, v.597*, n. 2, p.p. 179-186.

[5] He, Yanhong; Kuhn, David D; *et al.* (2021). "Protein production from brewer's spent grain via wet fractionation: process optimization and techno-economic analysis". *Food and Bioproducts Processing, v.126*, p.p. 234-244.

[6] Panzella, Lucia; Moccia, Federica; *et al.* (2020). "Bioactive phenolic compounds from agri-food wastes: An update on green and sustainable extraction methodologies". *Frontiers in nutrition, v.7*, p.p. 60.

# Evaluación de la ventana de procesabilidad en impresión 3D mediante la caracterización reológica de biocompuestos basados en PLA

**de la Rosa-Ramírez, Harrison[(1)], Boronat Soler, Judith[(1)], Calderón Jiménez, Fabricio[(2)], Ferrándiz Bou, Santiago[(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n. 03801, Alcoy (Alicante). Email: hardela@epsa.upv.es*

*(2) Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago Province, Cartago, Dulce Nombre, 30109, Costa Rica*

## RESUMEN

El desarrollo de biocompuestos basados en ácido poliláctico (PLA) para la fabricación mediante filamento fundido (FFF) exige un control riguroso de sus propiedades viscoelásticas para garantizar una procesabilidad óptima. Este trabajo evalúa la ventana de procesabilidad en impresión 3D de biocompuestos de PLA con grafito mediante una caracterización reológica oscilatoria a 200 °C. Mediante ensayos de barrido de amplitud, se delimitó la región de viscoelasticidad lineal (LVER) de los materiales, un parámetro crítico para prevenir la degradación estructural durante el análisis y para comprender la resistencia del fundido. Asimismo, los barridos de frecuencia, realizados en un rango de 100 a 0,1 Hz con una deformación controlada del 0,2 %, permitieron evaluar la respuesta viscoelástica y revelaron las transiciones sólido-líquido. Los resultados demuestran cómo la arquitectura reológica modificada por las cargas determina el comportamiento macroscópico del material fundido.

**Palabras clave:** región viscoelástica lineal, punto de fluencia, ventana de procesabilidad, impresión 3D por extrusión, biocompuestos de PLA.

## INTRODUCCIÓN

La fabricación por filamento fundido (FFF), una de las técnicas de impresión 3D más extendidas, ha evolucionado desde el prototipado rápido hasta la producción de componentes funcionales avanzados. En el contexto de la bioeconomía circular y de la mitigación del impacto ambiental de los plásticos de origen fósil, el ácido poliláctico (PLA) se ha consolidado como el polímero biodegradable y biobasado de referencia en FFF [1]. Sin embargo, el PLA puro presenta limitaciones inherentes, como baja resistencia en estado fundido y una ventana de procesamiento estrecha, lo que limita su desempeño en aplicaciones técnicas. Para mitigar estas deficiencias y mejorar sus propiedades, se ha recurrido a la incorporación de cargas funcionales o de refuerzos, lo que ha dado lugar a biocompuestos basados en PLA.

La introducción de una fase dispersa altera la microestructura y el comportamiento hidrodinámico del polímero fundido. Durante el proceso de FFF, el material experimenta un historial de deformaciones térmicas y mecánicas: es sometido a elevadas tasas de cizalla durante la eyección a través de una boquilla milimétrica, seguidas de una caída de los esfuerzos y de un posterior enfriamiento al ser depositado capa por capa. Por tanto, el éxito de la impresión no solo depende de las variables de la máquina, sino

también de la capacidad del material para fluir sin generar sobrepresiones en el extrusor y, simultáneamente, soportar el peso de las capas superiores sin sufrir un colapso geométrico ni una colada fluida.

La caracterización reológica oscilatoria en estado fundido se erige como la herramienta fundamental para descifrar la ventana de procesabilidad de estos sistemas. Parámetros como los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') actúan como un puente directo entre la microestructura del biocompuesto y su desempeño en la impresora [2]. El análisis reológico permite mapear, a través de barridos de amplitud y frecuencia, desde el límite de estabilidad estructural mediante la Región Viscoelástica Lineal (LVER) y el punto de fluencia hasta fenómenos de escala temporal como la relajación molecular y las transiciones viscoelásticas del polímero.

Este estudio aborda la evaluación de la ventana de procesabilidad en la impresión 3D de biocompuestos de PLA mediante reometría oscilatoria a la temperatura de procesamiento (200 °C). Mediante un enfoque secuencial centrado en barridos de amplitud y de frecuencia, se cuantifica el impacto de la carga en las transiciones funcionales del polímero. Este enfoque proporciona un marco analítico predictivo que trasciende el método tradicional de ensayo y error en la optimización de los parámetros de impresión 3D.

## OBJETIVOS

Establecer y correlacionar los límites de la ventana de procesabilidad en impresión 3D de biocompuestos basados en PLA mediante su caracterización reológica.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Materiales y preparación de muestras

Una matriz polimérica biodegradable de ácido poliláctico (PLA) Snow White se empleó en las formulaciones de PLA-grafito. Todas las formulaciones se sometieron a un protocolo de deshumidificación previo en una estufa a 60 °C durante 6 horas. Las probetas para los ensayos reológicos se prepararon en forma de discos de 25 mm de diámetro. Las mediciones reológicas se realizaron en un reómetro rotativo de estrés controlado AR-G2 de TA Instruments (New Castle, USA). Se utilizó una configuración de platos paralelos de acero inoxidable de 25 mm de diámetro con un espacio de trabajo (gap) fijado en 1,5 mm para prevenir la degradación termo-oxidativa e hidrolítica del PLA en condiciones de atmósfera ambiental.

### Caracterización

#### 1. Barrido de Deformación (Strain Sweep)

La delimitación de la Región de Viscoelasticidad Lineal (LVE) fue el primer paso para establecer las condiciones de los ensayos dinámicos oscilatorios. Los experimentos se realizaron a una temperatura de 200 °C y a una frecuencia de oscilación constante de 1,0 Hz (6.28 rad/s), incrementando la amplitud de la deformación por cizalla ($\gamma$) de forma logarítmica desde el 0,01 % hasta el 100 %. Se registraron los perfiles de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G") para identificar la deformación crítica a partir de la cual el material presenta un comportamiento no lineal.

### 2. Barrido de Frecuencia (Frequency Sweep)

La arquitectura estructural y el espectro de relajación de los biocompuestos de PLA-Grafito se caracterizaron mediante barridos de frecuencia en modo oscilatorio. Empleando la amplitud de deformación constante previamente determinada en la región LVE (0,2 %), se barrió la frecuencia angular (ω) en un intervalo descendente y logarítmico desde 628,3 rad/s hasta 0,63 rad/s (de 100 Hz a 0,1 Hz) a una temperatura constante de 200 °C. Se determinaron las curvas dependientes de *G'*, *G''*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Barrido de Deformación: Estabilidad y Delimitación de la LVER

Según la Figura 1, el módulo de pérdida predomina sobre el módulo de almacenamiento (G'' > G') en el rango de bajas deformaciones ($10^{-2}$ % a $10^{-1}$ %) para todas las formulaciones. Este fenómeno corrobora que, a la temperatura de procesamiento de 200 °C y a las concentraciones de carga evaluadas, las formulaciones exhiben un comportamiento macroscópico predominantemente viscoso. Al comportarse como un líquido con cierta elasticidad, el fundido disipa más energía de la que almacena.

La ausencia de un cruce de módulos (G' > G'') a bajas deformaciones demuestra que las partículas de grafito no forman una red tridimensional elástica ni una estructura de gel autosustentada en reposo, y que el comportamiento del fundido sigue siendo esencialmente gobernado por la matriz de PLA [3].

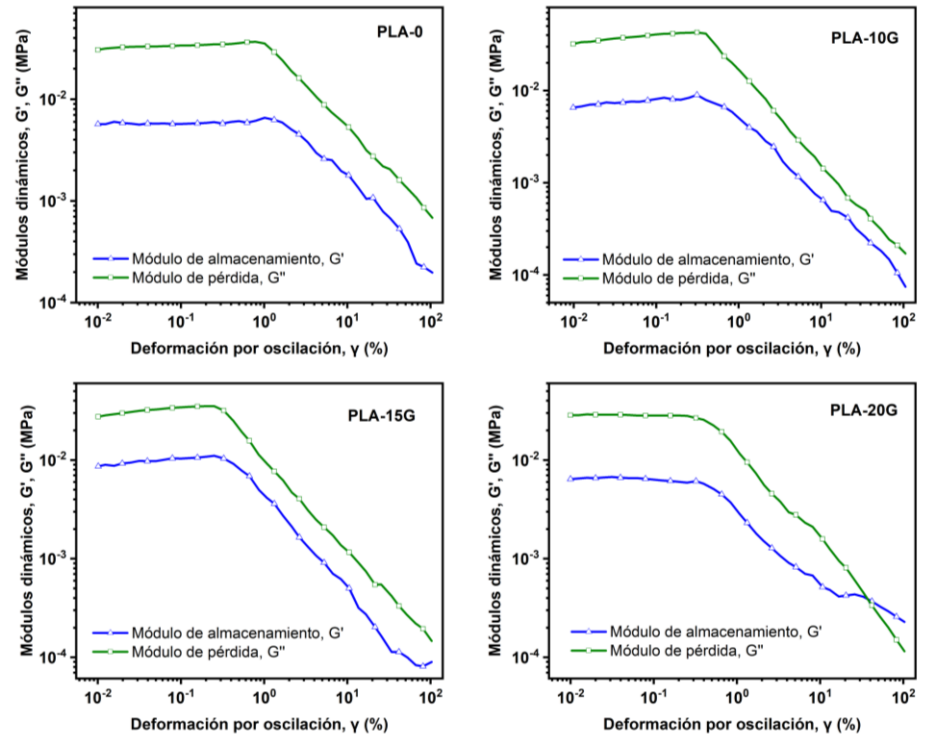



**Figura 1**. Amplitud de deformación de los módulos viscoelásticos (G' y G'') a 200 °C: Efecto del incremento de la concentración de carga y de la transición al comportamiento no lineal.

No obstante, la arquitectura interna del material se ve afectada por la fase dispersa. Para el PLA puro (PLA-0), la Región de Viscoelasticidad Lineal (LVER) es amplia, y ambos módulos se mantienen independientes del esfuerzo hasta una deformación

crítica de linealidad $\gamma_C$ ≈ 1,0 %. Con la menor fracción de carga (PLA-10G), la LVER presenta una contracción sutil. Sin embargo, en los biocompuestos con mayor contenido de grafito (PLA-15G y PLA-20G), el límite de la LVER se contrae drásticamente, registrándose el inicio del régimen no lineal a una deformación crítica prematura de $\gamma_C$ ≈ 0,2 % – 0,3 % en la formulación de máxima carga (PLA-20G).

Esta reducción sistemática de la LVER con el aumento de grafito se atribuye a la debilidad de las interacciones secundarias (fuerzas de Van der Waals) en la interfase polímero-carga y entre las láminas de grafito [4].

Estas estructuras interparticulares son altamente sensibles al cizallamiento. Por tanto, amplitudes de oscilación bajas interrumpen el orden local de las partículas dispersas, acelerando el desentrelazamiento de las macromoléculas de PLA en la proximidad de la carga y provocando la transición no lineal. Por encima de $\gamma_C$, ambos módulos disminuyen de forma continua debido al ablandamiento por deformación (strain thinning).

A partir de estos perfiles, se determinó cuantitativamente que una deformación constante del 0,2 % se encuentra de forma segura dentro de la LVER de todas las formulaciones, lo que garantiza que los ensayos posteriores de barrido de frecuencia evalúen la dinámica molecular de los biocompuestos basados en PLA-Grafito en condiciones de equilibrio estructural intactas.

**Barrido de Frecuencia: Dinámica Molecular y Ventana de Procesabilidad**

La Figura 2 muestra la respuesta viscoelástica de los materiales en función de la frecuencia, en el intervalo de 0,1 a 100 Hz, a una deformación controlada del 0,2 %. El PLA puro (PLA-0) presenta el espectro típico de un polímero fundido homogéneo y lineal. A bajas frecuencias (0,1 – 1,0 Hz), domina el flujo viscoso (G" > G'), ya que las cadenas disponen de escalas de tiempo largas para relajarse. Al aumentar la frecuencia, las curvas de los módulos se intersectan en un punto de cruce (*crossover*) aproximado a los 10 Hz, que corresponde al inverso del tiempo de relajación característico del PLA. Por encima de este valor, el material entra en una transición vítrea-elástica, en la que predomina la respuesta de los enredos mecánicos (G' > G"). La introducción de la baja concentración de grafito (PLA-10G) conserva esta misma tendencia y mantiene el punto de cruce en la misma región, lo que indica que la fase dispersa a esta concentración no altera de manera significativa la dinámica de relajación global de la matriz.

Por el contrario, las formulaciones con concentraciones crecientes de carga (PLA-15G y PLA-20G) modifican sustancialmente el espectro viscoelástico. En la región de bajas frecuencias (0,1 - 2,0 Hz), los valores absolutos de G' y G" aumentan hasta dos órdenes de magnitud respecto de los de la matriz PLA-0. Este incremento se atribuye al efecto de refuerzo hidrodinámico de las láminas de grafito, que actúan como obstáculos físicos que confinan las cadenas de PLA y restringen su movilidad de largo alcance. Sin embargo, en concordancia con los barridos de deformación, se corrobora que G" permanece por encima de G' en esta zona, lo que ratifica la ausencia de una red elástica percolada estable en reposo [5].

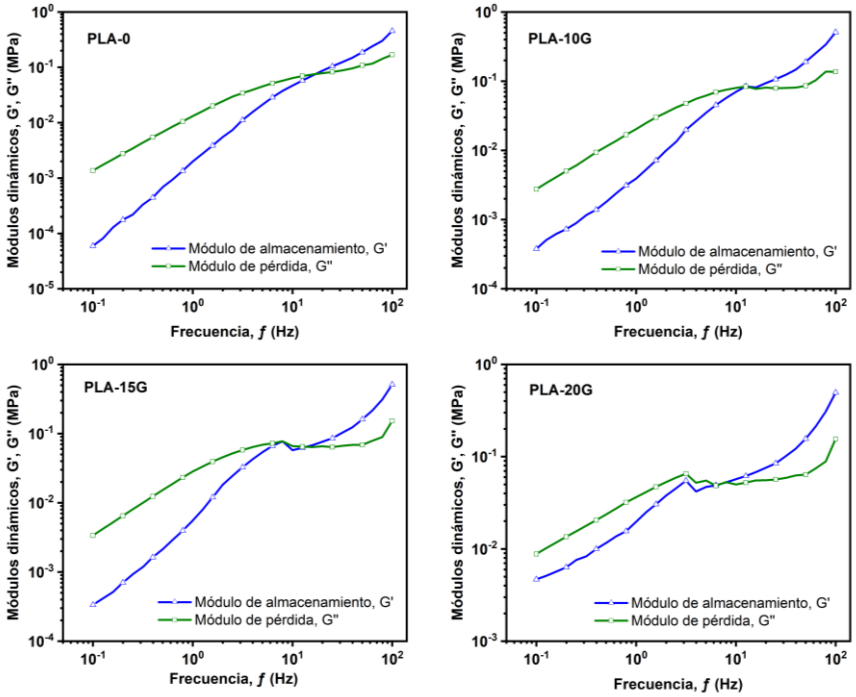



**Figura 2**. Espectro viscoelástico de los módulos dinámicos (G' y G'') en función de la frecuencia, para: PLA puro y biocompuestos con carga creciente de grafito.

El aspecto más relevante en las muestras con mayor carga (PLA-15G y PLA-20G) es la aparición de un "hombro" reológico o una discontinuidad local en el rango de frecuencias intermedias (3 – 10 Hz), que altera la linealidad de las curvas. Este fenómeno se identifica como una transición cinético-interfacial: a estas frecuencias, el estímulo mecánico entra en resonancia con los tiempos de respuesta de la interfase polímero-carga, lo que provoca una disrupción transitoria, deslizamientos locales del PLA sobre el grafito y un reordenamiento de las partículas. Tras superar esta inestabilidad, a altas frecuencias (> 20 Hz), el G' experimenta un incremento pronunciado y supera en amplitud al G'', ensanchando la ventana elástica debido a la acción cooperativa entre los enredos moleculares y la fase dispersa bajo deformaciones rápidas.

**Implicaciones en el Proceso de Impresión 3D**

**Régimen de Extrusión (Altas Frecuencias):** Al ser forzado a través de la boquilla milimétrica del extrusor, el material experimenta altas tasas de cizalla (equivalentes a las de la zona de altas frecuencias). En esta etapa, el incremento del G' en los biocompuestos con mayor carga generará una mayor resistencia viscoelástica en el fundido. Esto se traducirá en un incremento de la presión hidrodinámica interna en el cabezal de extrusión, lo que exige un control estricto del torque del motor y de la temperatura de la boquilla para mitigar los riesgos de sobrepresión o taponamiento.

**Régimen de Post-Deposición y Reposo (Bajas Frecuencias):** Después de la eyección, el esfuerzo cesa y el material pasa al régimen de reposo. En este punto, el incremento de hasta dos órdenes de magnitud en los valores absolutos de los módulos dinámicos resulta altamente ventajoso. A pesar de mantener un carácter fluido (G'' > G'), el incremento en la consistencia estructural y la viscosidad del fundido restringe de manera eficiente el goteo indeseado y confiere al material una mayor resistencia estructural, lo que permite sostener con éxito el peso de las capas superiores y garantiza una excelente fidelidad geométrica y estabilidad dimensional de la pieza impresa.

## CONCLUSIONES

La caracterización reológica oscilatoria a 200 °C permitió delimitar la ventana de procesabilidad para la impresión 3D (FFF) de biocompuestos basados en PLA-Grafito, correlacionando su microestructura con su comportamiento macroscópico en estado fundido. Los barridos de deformación demostraron que el grafito contrae la región viscoelástica lineal (LVER), desplazando la deformación crítica ($\gamma_C$) desde 1,0 % en (PLA-0) hasta valores cercanos a 0,2 % en las formulaciones con mayor carga (PLA-15G y PLA-20G). Esto evidencia la alta susceptibilidad hidrodinámica de las interacciones débiles en la interfase polímero-carga ante perturbaciones mecánicas, lo que valida el uso de una deformación del 0,2 % como límite superior óptimo para mantener la integridad de las muestras durante los análisis dinámicos.

En consecuencia, la ventana de procesabilidad para la impresión 3D de estos biocompuestos se delimita a una temperatura de 200 °C y a un régimen de deformación crítico de 0,2 %, parámetro indispensable para preservar la integridad de la interfase polímero-carga en las formulaciones de mayor carga de grafito. En la etapa de alta cizalla (extrusión a frecuencias > 20 Hz), el incremento del G' impone una mayor resistencia que exigirá un control riguroso del torque y la presión en el cabezal; mientras que en la etapa de post-deposición (reposo a frecuencias 0,1 Hz), el incremento de hasta dos órdenes de magnitud en la consistencia del fundido expande la ventana de éxito de imprimibilidad, al proveer la rigidez necesaria para mitigar el goteo y evitar el colapso geométrico de las capas depositadas durante el enfriamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Harrison de la Rosa-Ramírez agradece la ayuda postdoctoral PAID-10-24 de la Universitat Politècnica de València y reconoce la concesión de la ayuda para Primeros proyectos de investigación (PAID-06-25). (01/01/26 - 31/12/27).

## REFERENCIAS

[1] Bhagia, S. et al (2021). “Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries” *Applied Materials Today*, v. 24, p. 101078. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078

[2] Arrigo, R.; Frache, A. (2022). “FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior” *Polymers*, v. 14, n. 9, p. 1754. https://doi.org/10.3390/polym14091754

[3] Wang; Y. et al. (2025). “Percolation networks and transient rheology of polylactide composites containing graphite nanosheets with various thicknesses” *Polymer*, v. 67, p.p. 216–226. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.04.076

[4] Morimune-Moriya, S. (2022). “Polymer/nanocarbon nanocomposites with enhanced properties” *Polymer Journal*, v. 54, n. 8, p.p. 977–984. https://doi.org/10.1038/s41428-022-00644-w

[5] Kotsilkova, R.; Tabakova, S. (2023). “Exploring Effects of Graphene and Carbon Nanotubes on Rheology and Flow Instability for Designing Printable Polymer Nanocomposites” *Nanomaterials*, v. 13, n. 5, p. 835. https://doi.org/10.3390/nano13050835

# Metodología experimental para la evaluación del coeficiente de Poisson en un textil elástico con geometría auxética cortada por láser

**Pérez Ripoll, María[(1)], David Mínguez-García[(1)], Ainhoa Sánchez-Martínez[(1)], Jaime Gisbert-Payá[(1)]**

*(1) Departamento Textil y Papelera, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrandiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain; e-mail: mperez@easdvalencia.com*

## RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología experimental para el análisis del coeficiente de Poisson en textiles elásticos con geometrías auxéticas obtenidas mediante corte láser. El estudio se realiza sobre un tejido de poliéster y elastano al que se aplica una misma geometría de corte, evaluando cuatro estados de fatiga: muestra sin fatigar y muestras sometidas a 1000, 5000 y 20000 ciclos. Las probetas, con una longitud inicial de 200 mm y una anchura de 50 mm, se someten a elongaciones progresivas hasta 220, 240, 260 y 280 mm. En cada estado de deformación se realiza un registro fotográfico y se analiza la variación transversal mediante el software ImageJ, permitiendo calcular el coeficiente de Poisson asociado a cada condición experimental. Además, se documentan visualmente las deformaciones residuales y variaciones de espesor generadas tras los ensayos de fatiga. La metodología propuesta permite comparar la respuesta longitudinal-transversal de las muestras y establecer un procedimiento accesible para el análisis geométrico de textiles deformables con patrones cortados por láser.

**Palabras clave:** coeficiente de Poisson, ImageJ, corte láser, fatiga cíclica, geometrías auxéticas.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la deformación en materiales textiles elásticos resulta relevante para comprender su comportamiento mecánico en aplicaciones sometidas a tracción, repetición de uso y adaptación geométrica. En este contexto, la incorporación de geometrías obtenidas mediante corte láser permite modificar la respuesta estructural del tejido sin alterar su composición material, generando patrones capaces de transformar la relación entre deformación longitudinal y deformación transversal [1].

Los materiales auxéticos se caracterizan por presentar un coeficiente de Poisson negativo, es decir, muestran una expansión transversal cuando son sometidos a una tracción longitudinal, a diferencia de los materiales convencionales, que tienden a estrecharse [1,2]. Este comportamiento puede originarse por la propia estructura interna del material o por la configuración geométrica aplicada sobre su superficie. En el ámbito textil, resulta habitual diferenciar entre material auxético y geometría auxética. Mientras que el material auxético presenta intrínsecamente una respuesta mecánica con coeficiente de Poisson negativo, la geometría auxética hace referencia a patrones estructurales capaces de modificar el comportamiento deformacional del soporte sobre el que se aplican, aunque este no llegue necesariamente a comportarse como un material plenamente auxético [3,4].

Las geometrías auxéticas aplicadas mediante corte láser sobre superficies flexibles han sido investigadas debido a su capacidad para generar aperturas controladas, redistribuir tensiones y modificar la deformación transversal durante la elongación. En materiales textiles, este comportamiento depende tanto de la geometría aplicada como de las propiedades elásticas del soporte [5]. Sin embargo, en muchos casos el textil no llega a presentar un comportamiento completamente auxético, sino una modificación parcial de su respuesta longitudinal-transversal derivada de la apertura geométrica producida durante la tracción.

Además de la geometría, la fatiga cíclica constituye un factor determinante en la evolución mecánica del textil. La repetición de ciclos de deformación puede provocar alteraciones permanentes en la estructura cortada, variaciones de espesor, deformaciones residuales o cambios en la capacidad de recuperación del material. Estudios previos sobre ensayos de fatiga en materiales textiles señalan la necesidad de evaluar no únicamente la resistencia mecánica, sino también la evolución geométrica y deformacional de las estructuras sometidas a ciclos repetidos [6].

Dentro de este contexto, el análisis experimental mediante herramientas de medición digital permite establecer procedimientos cuantificables para estudiar la deformación de textiles estructurados. El uso de registro fotográfico combinado con software de análisis de imagen, como ImageJ, facilita la obtención de medidas geométricas precisas durante diferentes estados de elongación, permitiendo calcular parámetros asociados al comportamiento longitudinal-transversal del material [7-9].

El presente trabajo propone una metodología experimental para evaluar el coeficiente de Poisson en un textil elástico con geometría auxética cortada por láser sometido a diferentes estados de fatiga. A partir de mediciones realizadas en varias elongaciones controladas, se comparan las variaciones transversales de cuatro muestras con distinto número de ciclos de fatiga, estableciendo un procedimiento de análisis aplicable al estudio de textiles deformables intervenidos mediante corte láser.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología experimental para la evaluación del coeficiente de Poisson mediante fotografías de ImageJ en un textil elástico con geometría auxética obtenida a través de corte láser, utilizando análisis dimensional a partir de registro fotográfico y medición digital mediante ImageJ.

De forma específica, el estudio pretende: analizar la variación transversal del material ante diferentes niveles de elongación longitudinal; comparar la respuesta longitudinal-transversal de muestras sometidas a distintos ciclos de fatiga.; establecer un procedimiento de medición reproducible para el análisis geométrico de textiles deformables.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Material y Geometría Auxética

El estudio se realizó sobre un tejido elástico compuesto por un 85% de poliéster y un 15% de elastano. Sobre el material se aplicó una geometría auxética mediante corte láser, manteniendo el mismo patrón en todas las muestras analizadas (Figura 1).

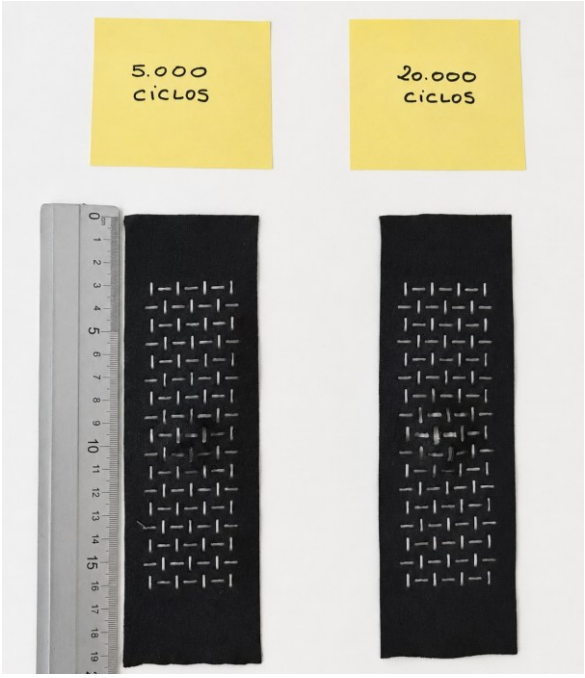



**Figura 1.** Muestra del material con las geometrías auxéticas cortadas a láser.

La geometría empleada se basa en el principio de estructuras rotatorias, descritas clásicamente mediante unidades rígidas cuadradas o rectangulares conectadas entre sus vértices, capaces de generar modificaciones en la respuesta longitudinal-transversal a través de la rotación relativa entre las unidades estructurales [10]. En este estudio, la configuración fue adaptada mediante el uso de unidades de contorno circular, generando una geometría rotatoria compuesta por elementos redondeados. Esta modificación geométrica se adoptó con el objetivo de reducir las concentraciones de tensión asociadas a esquinas pronunciadas, siguiendo estrategias descritas en investigaciones previas sobre geometrías auxéticas con menor localización de tensiones.

**Ensayo de fatiga y elongación**

Las probetas se prepararon con unas dimensiones iniciales de 200 mm de longitud. Con el fin de analizar la influencia de la fatiga sobre la respuesta longitudinal-transversal del material, se establecieron cuatro condiciones experimentales: una muestra sin fatigar y tres muestras sometidas previamente a ensayos de fatiga cíclica de 1000, 5000 y 20000 ciclos, respectivamente. El proceso de fatiga cíclica se realizó previamente al ensayo de elongación, con el fin de evaluar la influencia de la repetición de carga sobre la respuesta geométrica y dimensional del textil estructurado mediante corte láser. (Figura 2).

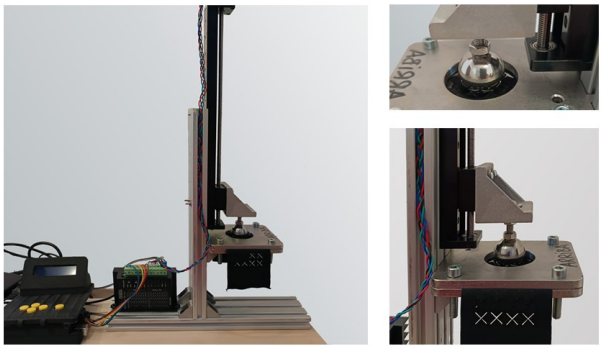


**Figura 2.** Imágenes del ensayo a fatiga.

Tras el ensayo de fatiga, las muestras fueron extraídas y documentadas visualmente para registrar posibles deformaciones residuales, alteraciones geométricas y variaciones de espesor producidas por la repetición de carga (Figura 3). Posteriormente, cada muestra fue sometida a elongaciones longitudinales progresivas hasta alcanzar longitudes de 220, 240, 260 y 280 mm.



**Figura 3.** Alteraciones geométricas debido a fatiga de 20.000 ciclos.

En cada estado de elongación se mantuvo la muestra estabilizada para realizar el registro fotográfico y las mediciones correspondientes. Las diferentes etapas de deformación longitudinal utilizadas durante el análisis experimental se muestran en la Figura 4.

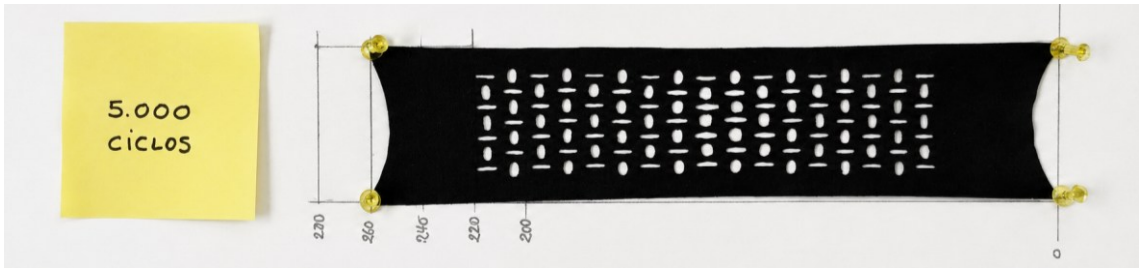



**Figura 4.** Muestra estabilizada a 260 mm para posterior medición.

## Procedimiento experimental y análisis mediante imagej

Para el registro fotográfico de las muestras se preparó una disposición experimental específica que permitiera mantener posiciones de elongación controladas y comparables entre todas las condiciones analizadas. Las probetas se fijaron sobre una superficie rígida de cartón pluma, utilizando referencias métricas para garantizar las longitudes de deformación establecidas durante el ensayo.

Las fotografías se realizaron manteniendo condiciones de iluminación constantes y una posición perpendicular de la cámara respecto al plano de la muestra, con el fin de minimizar deformaciones visuales y facilitar el posterior análisis dimensional. Para ello se utilizó iluminación artificial continua y captura mediante dispositivo móvil.

Las imágenes obtenidas fueron procesadas posteriormente mediante el software de análisis de imagen ImageJ, utilizado para medir las dimensiones transversales de las probetas en cada condición experimental (Figura 5). El procedimiento de análisis consistió en calibrar las imágenes a partir de una referencia dimensional conocida y realizar mediciones transversales comparativas entre las distintas etapas de elongación.

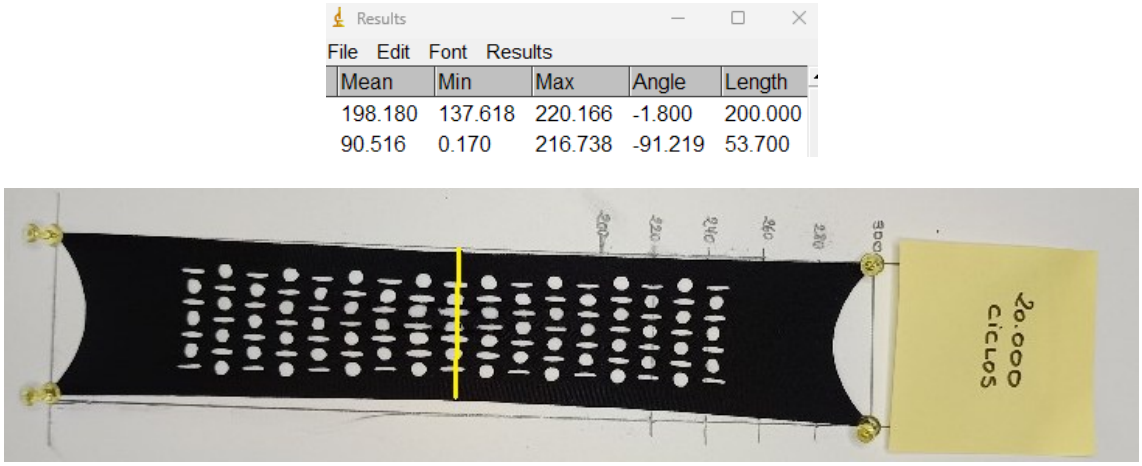



**Figura 5.** Medición en ImageJ.

A partir de los valores longitudinales y transversales obtenidos, se calculó el coeficiente de Poisson correspondiente a cada muestra mediante la relación entre deformación transversal y deformación longitudinal, según la siguiente expresión:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transverse}}{\varepsilon_{lontitudinal}}$$

donde:

- corresponde al coeficiente de Poisson.
- $\varepsilon_{transversal}$ representa la deformación transversal relativa.
- $\varepsilon_{longitudinal}$ representa la deformación longitudinal relativa.

La metodología permitió comparar la evolución de la respuesta longitudinal-transversal entre muestras con diferente número de ciclos de fatiga. Paralelamente, se realizó documentación fotográfica de las deformaciones residuales y de las variaciones de espesor observadas tras los ensayos de fatiga, con el objetivo de complementar el análisis dimensional y visualizar las alteraciones estructurales producidas por la carga repetitiva.

## CONCLUSIONES

La metodología experimental desarrollada permitió evaluar la respuesta longitudinal-transversal de un textil elástico con geometría auxética cortada por láser mediante

análisis dimensional basado en registro fotográfico e ImageJ. El procedimiento propuesto facilitó la obtención de medidas comparables entre diferentes estados de elongación y distintos niveles de fatiga cíclica.

El uso de ImageJ permitió establecer un método accesible y reproducible para el análisis geométrico de textiles deformables intervenidos mediante corte láser, posibilitando la medición de variaciones dimensionales a partir de imágenes digitales obtenidas en condiciones controladas.

La investigación confirma el interés de combinar registro fotográfico y análisis digital de imagen para el estudio experimental de geometrías aplicadas sobre textiles elásticos, especialmente en investigaciones relacionadas con deformación, adaptabilidad y comportamiento mecánico de estructuras flexibles sometidas a fatiga cíclica.

## REFERENCIAS

[1] Hu, H.; et al. (2011). "Auxetic textile materials – A review". Textile Research Journal, v. 81, n. 16, p.p. 1603–1620. https://doi.org/10.1177/0040517511402123

[2] Greaves, G. N.; Greer, A. L.; Lakes, R. S.; Rouxel, T. (2011). "Poisson's ratio and modern materials". Nature Materials, v. 10, p.p. 823–837. https://doi.org/10.1038/nmat3134

[3] Dobnik Dubrovski, P.; Novak, N.; Borovinšek, M.; Vesenjak, M.; Ren, Z. (2019). "In-plane behavior of auxetic non-woven fabric based on rotating square unit geometry under tensile load". Polymers, v. 11, n. 6, p.p. 1040. https://doi.org/10.3390/polym11061040

[4] Velásquez, R.; Zorrilla, P.; Carrión, N.; Valerio, J. (2021). "Garments elongation improvement: The use of digital fabrication technology to develop rotational and re-entering auxetic designs on fabrics". En: Fab16 Proceedings. https://doi.org/10.5281/zenodo.5169826

[5] Dobnik Dubrovski, P.; Novak, N.; Borovinšek, M.; Vesenjak, M.; Ren, Z. (2022). "In-plane deformation behavior and the open area of rotating squares in an auxetic compound fabric". Polymers, v. 14, n. 3, p.p. 571. https://doi.org/10.3390/polym14030571

[6] Otaghsara, M. R. T.; Jeddi, A. A. A.; Mohandesi, J. A. (2009). "Tensile property and fatigue behaviour of warp knitted fabrics". Fibres & Textiles in Eastern Europe, v. 17, n. 3, p.p. 70–75.

[7] Sánchez-Arévalo, F. M.; Pulos, G. (2008). "Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials". Materials Characterization, v. 59, p.p. 1572–1579. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.02.002

[8] Bogdanov, A. A.; Panin, S. V.; Lyubutin, P. S.; Eremin, A. V.; Buslovich, D. G.; Byakov, A. V. (2022). "An automated optical strain measurement system for estimating polymer degradation under fatigue testing". Sensors, v. 22, n. 16, p.p. 6034. https://doi.org/10.3390/s22166034

[9] Schneider, C.A.; Rasband, W.S.; Eliceiri, K.W. (2012). "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". Nature Methods, v. 9, n. 7, p.p. 671–675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

[10] Barillas, M. (2020). "Materiales auxéticos: una breve descripción y avances en la reducción de la concentración de esfuerzos". Revista de Investigación y Desarrollo Tecnológico, v. 6, n. 1, p.p. 45–58. https://doi.org/10.5377/ridt.v6i1.10705

# Realización de espectros para un patrón de ceros de orden 3

**Boix-García, Macarena [(1)], López Rodríguez, Daniel[(1)], Agud-Albesa, Lucía[(1)]**
*(1) Dpto. Matemática Aplicada. Universitat Politècnica de València, Pza. Ferrándiz y Carbonell, s/n, Alcoy-03801*
*mboix@mat.up.es, dalorod@upv.es, lagudal@mat.upv.es*

## RESUMEN

En este trabajo se estudia un patrón de ceros-no ceros de orden 3 no trivial y se analiza su capacidad para realizar cualquier conjunto de valores propios simples. Se utiliza el método de la Jacobiana sobre una matriz nilpotente inicial para demostrar constructivamente la realizabilidad de espectros arbitrarios. La metodología se implementa en *Mathematica* utilizando comandos especializados para el manejo simbólico y matricial. Se emplea MatrixPower para construir potencias de matrices, ConstantArray para trabajar con la matriz nula, Eigenvalues para obtener los valores propios, CoefficientList para obtener los coeficientes del polinomio característico en orden creciente, Most para que elimine el coeficiente principal, Reverse para expresar coeficientes en orden decreciente. Minors para obtener subdeterminantes relevantes. También se utilizan PolynomialReduce, Solve y Sum para manipular expresiones polinómicas, automatizar cálculos y resolver sistemas. El comando MatrixForm facilita la presentación clara y ordenada de los resultados.

**Palabras clave:** *zero-nonzero pattern*, Jacobiana, autovalor, autovector, Mathematica.

## INTRODUCCIÓN

Los patrones de ceros y no ceros *(zero–nonzero patterns*) son matrices estructurales que indican qué entradas pueden ser cero y cuáles no. Un patrón se dice espectralmente arbitrario si, para cualquier conjunto de valores propios, existe una matriz que respete el patrón y tenga esos valores propios. Los patrones de orden 3 son suficientemente simples para estudiar exhaustivamente, pero aún pueden contener estructuras no triviales. El problema de determinar cuándo un patrón de ceros es espectralmente arbitrario consiste en decidir si puede realizar cualquier polinomio característico mónico del grado correspondiente mediante una matriz real que respete dicho patrón. Una herramienta fundamental para abordar este problema es el **método de la Jacobiana**, introducido para transferir el problema espectral a uno de invertibilidad local de aplicaciones polinomiales.

Sea $\mathcal{P}$ un patrón de ceros de orden n con k entradas potencialmente no nulas. Asociamos a $\mathcal{P}$ una matriz paramétrica A donde cada entrada permitida del patrón se sustituye por una variable independiente. El polinomio característico de A con indeterminada $\lambda$ es: $\lambda^n + f_1(x)\lambda^{n-1} + f_2(x)\lambda^{n-2} + \cdots + f_{n-1}(x)\lambda + f_n(x)$ donde cada $f_i, i = 1, \ldots, n$ es una función polinómica. Definimos la aplicación $F(x) = (f_1(x), f_2(x), .., f_n(x))$. El método consiste en encontrar una matriz $N$ del patrón que sea nilpotente, calcular la Jacobiana $J$ de F respecto a las variables libres y verificar que $J(N)$ tiene rango máximo (igual a n). Si esto ocurre, el Teorema de la Función Inversa garantiza que F es localmente invertible en un entorno de $N$. En consecuencia, la imagen de F contiene un abierto de $\mathbb{R}^n$. Esto implica que el patrón puede realizar cualquier polinomio mónico suficientemente cercano al polinomio característico de $N$. Cuando el nilpotente tiene índice máximo (es decir, $N^n = 0$), el argumento se puede extender para

concluir que el patrón es fuertemente espectralmente arbitrario (SAP). En dimensión 3, esta propiedad, junto con la existencia de un nilpotente de índice máximo, permite concluir que el patrón puede realizar cualquier polinomio mónico real de grado 3, incluyendo aquellos con: tres raíces simples, una raíz doble y una simple y una raíz triple.

## OBJETIVOS

Como ya se ha indicado anteriormente, en este trabajo vamos a utilizar el método de la Jacobiana para demostrar que un *zero-nonzero pattern* es fuertemente espectralmente arbitrario. Posteriormente construiremos matrices genéricas que realizan dicho patrón.

Además, se trabajará con el paquete matemático *Mathematica* y se ilustrará tanto el proceso, como los comandos necesarios para llevarlo a cabo.

## PRELIMINARES

**Definición 1** Dado un *zero-nonzero pattern* de orden 3, de la forma: $P = \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & 0 & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$, consideramos el conjunto de matrices con este patrón: $\boldsymbol{\mathcal{A}}(\boldsymbol{P}) = \{A \in \mathbb{M}_{3x3}(\mathbb{C}): a_{ij} = 0 \; si \; P_{ij} = 0, a_{ij} \neq 0 \; si \; P_{ij} = *\}$ y decimos que una matriz $A = (a_{ij})$ es una realización del patrón P si y solo si $A \in \boldsymbol{\mathcal{A}}(\boldsymbol{P})$.

**Definición 2** Un patrón es irreducible si no puede ponerse por permutación simultánea de filas y columnas en forma triangular por bloques, es decir, no se puede reordenar la matriz para que tenga esta forma $\begin{pmatrix} \boldsymbol{B} & * \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C} \end{pmatrix}$. En un patrón irreducible, su grafo dirigido asociado es fuertemente conexo, esto es, para cualquier par de vértices (nodos) u, v en el grafo, existe un camino orientado desde u hacia v y viceversa.

**Definición 3** Una matriz $A$ de orden n es nilpotente si existe un entero positivo k de forma que $A^k = 0$. El menor entero positivo k para el cual esto ocurre se denomina índice de nilpotencia. El índice de nilpotencia siempre es menor o igual que el orden de la matriz. Las matrices nilpotentes tienen la característica de ser singulares, con determinante y traza iguales a cero y todos sus valores propios son nulos.

**Propiedad 1** Sea *A* = ($a_{ij}$) una matriz de orden *n*. Podemos expresar su polinomio característico de la siguiente forma:

$$q_a(\lambda) = \lambda^n - tr(A)\,\lambda^{n-1} + M_2\,\lambda^{n-2} - M_3\,\lambda^{n-3} + \ldots + (-1)^n det(A),$$

siendo $M_i$, i = 2, …, n−1 la suma de los menores principales de orden *i*, tr(A) la traza de *A* y det(A) el determinante de *A*. Sea A una matriz de orden 3. Podemos expresar su polinomio característico de la forma siguiente:

$$q_A(\lambda) = \lambda^3 - tr(A)\,\lambda^2 + M_2\,\lambda - |A|$$

donde: $tr(A)$ es la suma de los elementos de la diagonal principal, $M_2$ es la suma de los menores principales de orden 2 y $|A|$ es el determinante de $A$.

**Definición 4** Sea $f: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$ una función cuyas derivadas parciales de primer orden existen en todo $\mathbb{R}$ y denotemos $f_1, f_2, \ldots, f_m$ a sus componentes escalares. Se define la matriz jacobiana $J$ de $f$ en un punto $x \in \mathbb{R}^n$ como:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(x) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial f_m}{\partial x_2}(x) & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x) \end{pmatrix}$$

## PROCEDIMIENTO A SEGUIR

1. Definición del patrón. Consideramos el patrón irreducible de orden 3: $P = \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & 0 & * \\ 0 & * & * \end{pmatrix}$

donde * indica entradas libres (pueden tomar cualquier valor no nulo).

2. Construcción de una matriz nilpotente. Se construye una matriz nilpotente inicial de índice 3 que respeta el patrón. Consideramos la matriz: $M = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} & 0 \\ n_{21} & 0 & n_{23} \\ 0 & n_{32} & n_{33} \end{pmatrix}$ , de forma que si $q_M(\lambda) = \lambda^3$, al ser todos sus valores propios nulos, la matriz es nilpotente, i.e. $M^3$ es la matriz nula.

3. Introducción de variables libres. Se introducen variables en las posiciones libres para aplicar el método de la Jacobiana. Perturbamos únicamente las entradas permitidas (los *) manteniendo fijos los ceros estructurales.

$$A_{vars} = \begin{pmatrix} n_{11} + x_{11} & n_{12} + x_{12} & 0 \\ n_{21} + x_{21} & 0 & n_{23} + x_{23} \\ 0 & n_{32} + x_{32} & n_{33} + x_{33} \end{pmatrix}$$

4. Polinomio característico y Jacobiana. Se calcula el polinomio característico de $A_{vars}$

$$q_{A_{vars}}(\lambda) = \lambda^3 + f_1(var)\,\lambda^2 + f_2(var)\,\lambda + f_3(var)$$
$$q_{A_{vars}}(\lambda) = \lambda^3 - tr(A_{vars})\,\lambda^2 + M_2\,\lambda - |A_{vars}|$$

La Jacobiana se define como:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_{11}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{12}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{21}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{23}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{32}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{33}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_{11}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{12}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{21}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{23}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{32}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_{33}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_{11}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_{12}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_{21}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_{23}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_{32}} & \frac{\partial f_3}{\partial x_{33}} \end{pmatrix}$$

Si evaluando la Jacobiana en valores pequeños (por ejemplo 0.01 para todas las variables) se obtiene un menor de orden 3 distinto de cero, esto demuestra que cualquier conjunto de valores propios simples es realizable, es decir, al tener la Jacobiana rango máximo, este patrón irreducible de orden 3 es espectralmente arbitrario.

## RESULTADOS

Construcción de la matriz inicial nilpotente

Introducimos en Mathematica una matriz genérica cumpliendo el patrón dado:

$$M = \{\{\text{n11}, \text{n12}, 0\}, \{\text{n21}, 0, \text{n23}\}, \{0, \text{n32}, \text{n33}\}\};$$

A continuación resolvemos el siguiente sistema para que $M^3 = 0$

$$s = \text{Solve}[\{\text{MatrixPower}[M, 3] == \text{ConstantArray}[0, \{3,3\}], \text{n11} \neq 0, \text{n12} \neq 0, \text{n21} \neq 0, \text{n23} \neq 0, \text{n32} \neq 0, \text{n33} \neq 0\}]$$

$$\{\{\text{n11} \to -\text{n33}, \text{n21} \to -\frac{\text{n33}^2}{2\,\text{n12}}, \text{n32} \to -\frac{\text{n33}^2}{2\,\text{n23}}\}\}$$

Damos valores a $\{n_{12}, n_{23}, n_{33}\}$, por ejemplo:

$$\text{N1} = M/.s[[1]]; n = \text{N1}/.\{\text{n33} \to 2, \text{n23} \to 2, \text{n12} \to 2\}; n//\text{MatrixForm}$$

$$\begin{pmatrix} -2 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

Comprobamos que todos sus autovalores son 0:

$$\text{Eigenvalues}[n] === \{0,0,0\} \qquad \text{True}$$

```
(*Patrón de orden 3 no trivial*) vars = {x11, x12, x21, x23, x32, x33};
(*Matriz inicial Nilpotente*)    n = {{-2,2,0}, {-1,0,2}, {0,-1,2}};
```

Criterio de verificación por el rango máximo de la matriz Jacobiana

```
(*Construcción de la matriz con variables*)
Avars = {{-2 + x11, 2 + x12, 0}, {-1 + x21, 0, 2 + x23}, {0, -1 + x32, 2 + x33}};
(*Polinomiocaracterístico*) charPoly = Det[λ IdentityMatrix[3] - Avars]//Expand;
coeffs = CoefficientList[charPoly, λ]; (*devuelve en orden creciente*)
f = Reverse[Most[coeffs]];
(*Jacobiana respecto a variables libres*) j = D[f, {vars}]//Simplify;
                (*Buscar automáticamente un subdeterminante 3 x 3 no nulo*)
                    (*Generamos todas las combinaciones de 3 columnas*)
colCombs = Subsets[Range[Length[vars]], {3}];
(*Asignación de valores pequeños para test numérico*)
assignments = Thread[vars → ConstantArray[0.01, Length[vars]]];
found = None;
Do[detVal = Det[j[[All, cols]]]/. assignments//N;
If[Abs[detVal] > 10^ - 10, found = {cols, detVal};
Break[ ]; ], {cols, colCombs}];
If[found === None, Print["No se encontró subdeterminante 3x3 no nulo"],
Print["Submatriz columnas: ", found[[1]]];
Print["Determinante numérico: ", found[[2]]]; ]
```

Submatriz columnas: $\{1, 2, 4\}$ Determinante numérico: $-3.9204$

**Caso 1: tres autovalores distintos**

Si el polinomio característico tiene que ser $q_A(\lambda) = (\lambda - a)(\lambda - b)(\lambda - c)$, entonces el cociente de la división tiene que ser 1 y el resto tiene que ser 0.

$$\{q, r\} = \text{PolynomialReduce}[x\text{^}3 - (a + b + c)x\text{^}2 + \text{M2}x - abc, (x - a)(x - b)(x - c), x]$$
$$\{\{1\}, (-a\,b - a\,c - b\,c + \text{M2})x\}$$

Por tanto: $-ab - ac - bc + \text{M2} = 0$. Nuestra matriz genérica a obtener será:

$$A = \{\{\text{a11}, \text{a12}, 0\}, \{\text{a21}, 0, \text{a23}\}, \{0, \text{a32}, \text{a33}\}\};$$

Obtenemos $M_2$:

$$m = \text{Minors}[A, 2]; \text{M2} = \text{Sum}[m[[i]][[i]], \{i, 1, 3\}]$$
$$-\text{a12 a21} - \text{a23 a32} + \text{a11 a33}$$

Y ahora nos queda resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$s = \text{Solve}[\{-a\,b - a\,c - b\,c + \text{M2} == 0, a + b + c == \text{a11} + \text{a33}, \text{Det}[A] == a\,b\,c\}];$$

**Ejemplo:**

Si queremos que los valores propios sean $a, b, c$, eligiendo una de las opciones que nos da la solución del sistema e imponiendo que la variable libre $a_{11} \notin \left\{\frac{1}{2}(a + b + c), a + b + c,\ a,\ b,\ c,\ a + b,\ b + c,\ a + c\right\}$ tendríamos:

$$A = \begin{pmatrix} \text{a11} & \text{a12} & 0 \\ -\dfrac{(a - \text{a11})(\text{a11} - b)(\text{a11} - c)}{\text{a12}\,(a - 2\,\text{a11} + b + c)} & 0 & \text{a23} \\ 0 & \dfrac{(a - \text{a11} + b)(\text{a11} - b - c)(a - \text{a11} + c)}{\text{a23}\,(a - 2\,\text{a11} + b + c)} & a - \text{a11} + b + c \end{pmatrix}$$

Si elegimos, por ejemplo: $a = -1,\ b = -3,\ c = -4,\ a11 = 2,\ a12 = 5, a23 = -1$ tendremos:

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 5 & 0 \\ -3/2 & 0 & -1 \\ 0 & 63/2 & -10 \end{pmatrix}$$

Queda comprobar los autovectores:

$$\text{Eigenvectors[A]} \qquad \left\{\left\{-\frac{10}{63}, \frac{4}{21}, 1\right\}, \left\{-\frac{2}{9}, \frac{2}{9}, 1\right\}, \left\{-\frac{10}{21}, \frac{2}{7}, 1\right\}\right\}$$

Por tanto:

$$d = \text{DiagonalMatrix}[\text{Eigenvalues[A]}]; T = \text{Transpose}[\text{Eigenvectors[A]}];$$
$$d = \begin{pmatrix} -4 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} -10/63 & -2/9 & -10/21 \\ 4/21 & 2/9 & 2/7 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

**Caso 2: un autovalor a con multiplicidad algebraica = 2, un autovalor c simple**

Si el polinomio característico tiene que ser $q_A(\lambda) = (\lambda - a)(\lambda - a)(\lambda - c)$, entonces el cociente de la división tiene que ser 1 y el resto tiene que ser 0.

$$\{q, r\} = \text{PolynomialReduce}[x\text{^}3 - (2\,a + c)x\text{^}2 + \text{M2}x - a^2c, (x - a)^2(x - c), x]$$

$$\{\{1\}, (-a^2 - 2\,a\,c + \mathrm{M2})x\}$$

Por tanto: $-a^2 - 2\,a\,c + \mathrm{M2} = 0$. Nuestra matriz genérica a obtener será:

$$A = \{\{\mathrm{a11}, \mathrm{a12}, 0\}, \{\mathrm{a21}, 0, \mathrm{a23}\}, \{\mathrm{a31}, \mathrm{a32}, 0\}\};$$

Obtenemos $M_2$:

$$m = \mathrm{Minors}[A, 2]; \mathrm{M2} = \mathrm{Sum}[m[[i]][[i]], \{i, 1, 3\}]; -\mathrm{a12\ a21} - \mathrm{a23\ a32} + \mathrm{a11\ a33}$$

Y ahora, para obtener una de las clases de matrices genéricas, nos queda resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\mathrm{c1} = -a^2 - 2\,a\,c + \mathrm{M2} == 0; \mathrm{c2} = 2\,a + c == \mathrm{a11} + \mathrm{a33}; \mathrm{c3} = \mathrm{Det}[A] == a^2\,c;$$
$$s = \mathrm{Solve}[\{\mathrm{c1}, \mathrm{c2}, \mathrm{c3}\}]$$

**Ejemplo:**

Si queremos que los valores propios sean $a, a, c$, y eligiendo una de las opciones que nos da la solución del sistema, imponiendo la siguiente condición para la variable libre $a_{33} \notin \left\{\frac{1}{2}(2\,a + c),\ 2\,a + c,\ 2\,a,\ a + c,\ a,\ c\right\}$ tendríamos:

$A = \begin{pmatrix} 2a - \mathrm{a33} + c & \mathrm{a12} & 0 \\ -\frac{(2\,a - \mathrm{a33})(a - \mathrm{a33} + c)^2}{\mathrm{a12}\,(2\,a - 2\,\mathrm{a33} + c)} & 0 & \mathrm{a23} \\ 0 & \frac{(a - \mathrm{a33})^2(\mathrm{a33} - c)}{\mathrm{a23}(2a - 2\mathrm{a33} + c)} & \mathrm{a33} \end{pmatrix}$. Si elegimos por ejemplo: $a = -1,\ c = -2,$ $a12 = 3,\ a23 = 4, a33 = 5$ tendremos: $A = \begin{pmatrix} -9 & 3 & 0 \\ -32/3 & 0 & 4 \\ 0 & -9/2 & 5 \end{pmatrix}$.

**Caso 3: un autovalor a con multiplicidad algebraica = 3**

Si el polinomio característico tiene que ser $q_A(\lambda) = (\lambda - a)^3$, entonces el cociente de la división tiene que ser 1 y el resto tiene que ser 0. Procediendo como antes e imponiendo $a_{33} \notin \left\{3\,a, 2\,a, a,\ \frac{3\,a}{2}\right\}$ tendríamos:

$$A = \begin{pmatrix} 3\,a - \mathrm{a33} & \mathrm{a12} & 0 \\ -\frac{(2\,a - \mathrm{a33})^3}{\mathrm{a12}\,(3\,a - 2\,\mathrm{a33})} & 0 & \mathrm{a23} \\ 0 & -\frac{(a - \mathrm{a33})^3}{\mathrm{a23}\,(3\,a - 2\,\mathrm{a33})} & \mathrm{a33} \end{pmatrix}$$

## CONCLUSIONES

En este trabajo se demuestra que el patrón de ceros de orden 3 estudiado es espectralmente arbitrario: para cualquier multiconjunto de valores propios existe una matriz que respeta el patrón y tiene esos valores propios. El procedimiento mediante nilpotente y Jacobiana proporciona una construcción explícita y verificable. Este enfoque puede extenderse a patrones de mayor orden, combinando ciclos de nilpotentes y Jacobianas para estudiar realizaciones de espectros arbitrarios.

## REFERENCIAS

[1] Drew, J., et al. (2000). Spectrally arbitrary patterns. Linear Algebra and its Applications, 308(1-3), 121-137. https://doi.org/10.1016/S0024-3795(00)00026-4

[2] Kim, I.J. et al. (2017). Spectrally arbitrary pattern extensions. Linear Algebra and its Applications, 517, 120-128. https://doi.org/10.1016/j.laa.2016.12.010

# Efecto de la zeína plastificada sobre la respuesta mecánica y la morfología de fractura de mezclas de PLA procesadas por inyección

**Lázaro-Hdez, Carlos [(1)*], García-García, Daniel [(1)], Miranda-Pinzon, Mario [(1)], Boronat, Teodomiro [(1)]**

*(1) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de Materiales (IUITM), Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, Alicante.*
**Email: carlaher@epsa.upv.es*

## RESUMEN

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los biopolímeros más empleados como alternativa sostenible a los polímeros convencionales; sin embargo, su elevada fragilidad limita algunas de sus aplicaciones. En este trabajo se estudia la incorporación de zeína plastificada con dipropilenglicol (DPG), perteneciente a la familia de los glicoles, en una matriz de PLA con el objetivo de modificar su comportamiento mecánico y analizar su relación con la morfología desarrollada durante el procesado. Las probetas normalizadas de las diferentes mezclas fueron obtenidas mediante extrusión de doble husillo y moldeo por inyección. La caracterización se centró en ensayos de tracción, impacto Charpy, análisis morfológico de superficies de fractura y espectroscopía FTIR. Los resultados muestran que el aumento del contenido de zeína plastificada favorece la ductilidad del PLA, incrementando el alargamiento a la rotura. No obstante, también se observa una disminución de la resistencia mecánica y al impacto, asociada a la aparición de dominios ricos en zeína, cavidades y una adhesión interfacial limitada. El análisis FTIR confirma la presencia de interacciones físicas entre los componentes.

**Palabras clave:** PLA, zeína, plastificación, mezclas, ductilidad, microscopía.

## INTRODUCCIÓN

El creciente interés por el desarrollo de materiales poliméricos sostenibles ha impulsado la investigación en biopolímeros procedentes de fuentes renovables. Entre ellos, el ácido poliláctico (PLA) destaca por su alta disponibilidad, biodegradabilidad, buena resistencia mecánica y facilidad de procesado mediante tecnologías convencionales como extrusión, inyección o impresión 3D [3]. Estas características han favorecido su aplicación en sectores como el envase, la automoción, los bienes de consumo y el ámbito biomédico. A pesar de estas ventajas, el PLA presenta limitaciones asociadas a su elevada fragilidad y bajo alargamiento a la rotura. Estas propiedades restringen su uso en aplicaciones donde se requiere una mayor ductilidad. Para superar estas limitaciones se han propuesto diferentes estrategias, entre las que destacan la incorporación de plastificantes, el uso de cargas de refuerzo, la modificación química y la preparación de mezclas poliméricas [1].

Dentro de este contexto, las proteínas vegetales representan una alternativa interesante para el desarrollo de materiales biobasados. La zeína, proteína obtenida del maíz, presenta especial interés por su origen renovable, su carácter biodegradable y su disponibilidad como subproducto agroindustrial [2]. Sin embargo, su naturaleza rígida y

frágil dificulta su procesado termoplástico, por lo que es necesario el empleo de plastificantes que favorezcan su movilidad molecular y permitan su transformación mediante técnicas industriales [2].

Una de las familias de plastificantes que puede emplearse para mejorar la procesabilidad de biopolímeros proteicos es la de los glicoles [4]. Dentro de esta familia, el dipropilenglicol (DPG) resulta especialmente interesante debido a la presencia de grupos hidroxilo en su estructura, capaces de interaccionar con los grupos funcionales de la zeína [4]. Estas interacciones pueden favorecer la movilidad molecular de la fase proteica, reduciendo su rigidez y facilitando su procesado en estado fundido. Además, la incorporación de DPG puede contribuir a modificar parcialmente la compatibilidad entre la fase rica en zeína y la matriz de PLA, promoviendo interacciones físicas entre ambos componentes.

En este trabajo se analiza el efecto de la incorporación de zeína plastificada con DPG sobre el comportamiento mecánico y la morfología de mezclas PLA-zeína procesadas mediante extrusión e inyección.

## OBJETIVOS

El objetivo principal es correlacionar las propiedades mecánicas de las mezclas PLA-zeína plastificada con su morfología de fractura, con el fin de comprender cómo la incorporación de zeína plastificada modifica la ductilidad y la resistencia del PLA.

## EXPERIMENTAL

### Materiales

El PLA empleado como matriz fue ErcrosBio LL 712, suministrado por Ercros (Barcelona, España), con un índice de fluidez de 4 g/10 min según ISO 1133-A, a 190 ºC y 2,16 kg. La zeína fue suministrada por Sigma-Aldrich (Schnelldorf, Alemania), CAS 9010-66-6, con una humedad inferior al 8%. Como plastificante se utilizó dipropilenglicol (DPG), con peso molecular de 134,18 g/mol y pureza superior al 95% suministrado por Tokyo Chemical Industry Co. (Zwijndrecht, Bélgica). En la siguiente tabla se muestran las diferentes formulaciones que se van a procesar.

**Tabla 1.** Porcentaje en peso de cada material a procesar.

| Muestra | PLA (%) | Z (%) | zeina (%) | DPG (%) |
|---|---|---|---|---|
| Z (zeina+DPG) | - | - | 75 | 25 |
| PLA | 100 | - | - | - |
| PLA-10Z | 90 | 10 | - | - |
| PLA-20Z | 80 | 20 | - | - |
| PLA-30Z | 70 | 30 | - | - |
| PLA-40Z | 60 | 40 | - | - |
| PLA-50Z | 50 | 50 | - | - |

## Fabricación de los materiales

La fabricación de las mezclas se llevó a cabo en dos etapas: primero, la obtención de la fase proteica plastificada y, posteriormente, su incorporación a la matriz de PLA. Inicialmente, la zeína se mezcló con el plastificante DPG, en una proporción 75/25 en peso, con el objetivo de obtener una fase procesable. Esta mezcla, denominada Z, fue procesada a 130 ºC durante 1 min en una extrusora de doble husillo co-rotante y posteriormente pelletizada. El segundo paso fue preparar las diferentes formulaciones, empleando una temperatura de 170 ºC durante 1 min. En todos los casos, la velocidad se mantuvo en 100 rpm, con un par máximo de 40 N·m. Este procedimiento permitió obtener mezclas con contenidos crecientes de zeína plastificada, desde un 10% hasta un 50% en peso.

Tras el proceso de extrusión, las formulaciones fueron inyectadas en una mini-inyectora para obtener probetas normalizadas. Las condiciones de inyección se ajustaron en función de la composición. Para el PLA puro se empleó una temperatura de boquilla de 180 ºC, temperatura de molde de 35 ºC y presión de inyección de 8 bar. En el caso de las mezclas PLA-Z, la temperatura de boquilla se redujo a 170 ºC, manteniendo el molde a 35 ºC y aplicando una presión de inyección de 6 bar. En todos los casos, el tiempo de inyección fue de 7 s, seguido de un tiempo de compactación de 3 s. Este método de fabricación resulta especialmente relevante, ya que permite obtener materiales mediante técnicas escalables industrialmente**.**

## Caracterización

Caracterización mecánica

La caracterización mecánica de las diferentes formulaciones se realizó mediante tres ensayos principales: tracción con máquina universal, impacto con péndulo Charpy y medición de dureza utilizando un durómetro Shore D. Los resultados se mostrarán para analizar la evolución de la tensión máxima, la deformación y el módulo elástico, según la cantidad de Z. Asimismo, en el ensayo de impacto se evaluará cómo varía la energía absorbida en función de este mismo factor. Finalmente, también se analizarán los cambios en la dureza de las distintas formulaciones procesadas.

Análisis morfológico de la superficie de rotura

Se llevará a cabo un análisis morfológico de la superficie de fractura de las distintas formulaciones, con el objetivo de identificar las diferencias estructurales provocadas por el aumento de Z en la matriz de PLA. Este estudio servirá como complemento a la caracterización mecánica, facilitando la interpretación de los resultados obtenidos y proporcionando una visión más completa del comportamiento del material.

Análisis químico mediante FTIR

Se realizará un análisis químico mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourie (FTIR) con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en las formulaciones procesadas y evaluar posibles interacciones físicas entre los componentes. Esta técnica permitirá complementar los resultados mecánicos y morfológicos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización mecánica

Los resultados obtenidos para el PLA puro confirman su comportamiento característico como material rígido y frágil, con elevada resistencia a tracción y módulo elástico, pero con una deformación a rotura limitada. La incorporación de Z, modifica de forma progresiva la respuesta mecánica de las mezclas. A medida que aumenta el contenido de Z en la matriz de PLA, se observa una disminución de la resistencia a tracción y del módulo elástico, junto con un incremento significativo del alargamiento a la rotura. Este comportamiento se atribuye principalmente al efecto plastificante, que favorece la movilidad de las cadenas poliméricas y reduce la rigidez del sistema. Las formulaciones con mayor contenido de Z, especialmente PLA-40Z y PLA-50Z, presentan los valores más altos de deformación, evidenciando una mejora clara de la ductilidad del PLA. No obstante, esta mejora se produce a costa de una pérdida de resistencia mecánica.

**Tabla 2.** Resumen de las principales propiedades mecánicas evaluadas: propiedades mecánicas a tracción (resistencia máxima a tracción ($\sigma_m$), elongación a rotura ($\varepsilon_b$) y módulo elástico ($E_t$)), impacto Chapy ($a_{cU}$) y dureza (Shore D).

| Muestras | Tracción | | | Impacto Charpy | Dureza |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\sigma_m$ (MPa) | $\varepsilon_b$ (%) | $E_t$ (MPa) | $a_{cU}$ (kJ/m$^2$) | Shore D |
| PLA | 73,0 ± 2,5 | 3,8 ± 0,4 | 3028 ± 98 | 42,2 ± 3,7 | 82,9 ± 0,4 |
| PLA-10Z | 48,9 ± 1,7 | 4,0 ± 0,3 | 3180 ± 310 | 26,8 ± 1,2 | 82,4 ± 0,7 |
| PLA-20Z | 42,3 ± 4,4 | 6,0 ± 1,5 | 2958 ± 372 | 25,5 ± 2,4 | 82,2 ± 0,3 |
| PLA-30Z | 34,5 ± 48 | 8,0 ± 3,3 | 2421 ± 340 | 16,5 ± 1,8 | 81,8 ± 0,3 |
| PLA-40Z | 33,6 ± 4,1 | 25,5 ± 3,2 | 2364 ± 204 | 12,6 ± 2,3 | 80,2 ± 0,3 |
| PLA-50Z | 32,5 ± 30 | 56,2 ± 16,2 | 2063 ± 161 | 11,5 ± 1,7 | 77,4 ± 0,4 |

En cuanto al ensayo de impacto Charpy, la adición de Z provoca una disminución progresiva de la energía absorbida. Aunque las mezclas presentan mayor ductilidad en tracción, la resistencia al impacto se ve reducida debido a la presencia de dominios ricos en Z, lo que provoca posibles zonas de baja adhesión interfacial, que actúan como puntos de concentración de tensiones y favorecen la propagación de grietas, como se verá más adelante en el ensayo morfológico. Por otro lado, la dureza Shore D muestra una ligera reducción con el aumento del contenido de Z, coherente con el efecto plastificante y la menor rigidez de las formulaciones.

### Análisis morfológico de la superficie de rotura

El PLA puro presentó una superficie de fractura lisa y homogénea, característica de un comportamiento frágil. Sin embargo, la incorporación de Z provocó una morfología progresivamente más heterogénea, con presencia de dominios dispersos, cavidades y zonas porosas. Estas características fueron más evidentes en las formulaciones con mayor contenido de Z, indicando una separación de fases parcial y una adhesión interfacial limitada entre la matriz de PLA y la fase rica en Z.

Esta morfología explica la reducción de la resistencia a tracción y al impacto, ya que las cavidades y dominios mal dispersados actúan como puntos de concentración de tensiones y favorecen la propagación de grietas.

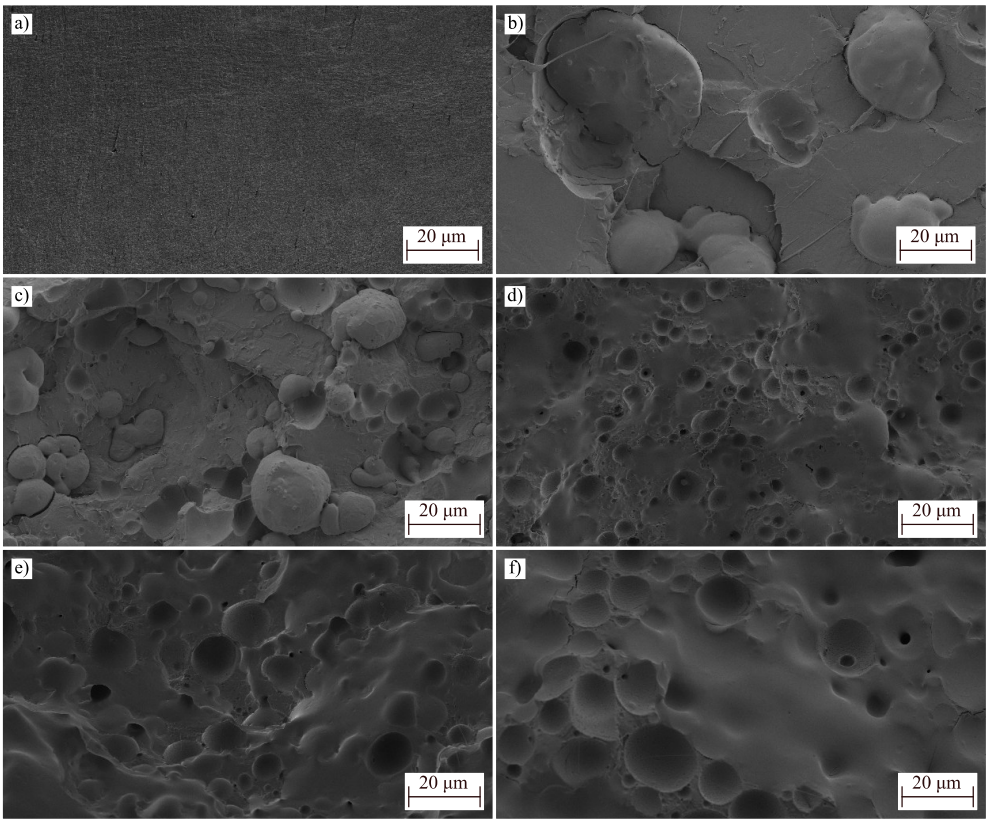



**Figura 1.** Imágenes FESEM a 500 aumentos. a) PLA, b) PLA-10Z, c) PLA-20Z, d) PLA-30Z, e) PLA-40Z y f) PLA-50Z.

## Análisis químico mediante FTIR

El análisis FTIR permitió confirmar la incorporación de Z en la matriz de PLA mediante la aparición e intensificación de bandas asociadas a los grupos amida de la proteína, principalmente en la región de 1650–1530 $cm^{-1}$. Asimismo, la banda característica del PLA situada en torno a 1745 $cm^{-1}$, asociada al estiramiento del grupo carbonilo C=O, mostró variaciones de intensidad y forma, lo que sugiere posibles interacciones físicas con Z. Además, el ensanchamiento observado en la región 3200–3400 $cm^{-1}$, atribuida a los grupos O–H, indica la posible formación de interacciones mediante enlaces de hidrógeno entre los componentes. No obstante, la ausencia de nuevas bandas características indica que no se producen reacciones químicas significativas entre los componentes, confirmando una compatibilidad parcial entre las fases.

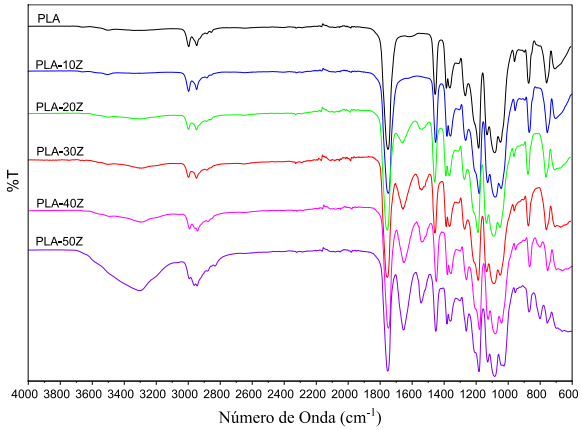



**Figura 2.** Espectros FTIR de las diferentes formulaciones procesadas.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de zeína plastificada con DPG, modifica significativamente el comportamiento mecánico del PLA. El aumento del contenido de Z favorece el incremento de la ductilidad debido al efecto plastificante del DPG y a la mayor movilidad molecular del sistema. Sin embargo, esta mejora se produce junto con una disminución de la resistencia máxima a tracción, del módulo elástico y de la resistencia al impacto Charpy, asociada a la compatibilidad parcial entre ambas fases. La caracterización morfológica confirma esta interpretación, mostrando que el PLA puro presenta una superficie de fractura lisa y homogénea, mientras que las mezclas desarrollan una morfología más heterogénea, con dominios ricos en Z y cavidades que actúan como puntos de concentración de tensiones. Además, el análisis FTIR permitió confirmar la incorporación de la zeína plastificada en la matriz de PLA y evidenciar posibles interacciones físicas. En conjunto, la incorporación de zeína plastificada permite modificar el comportamiento del PLA, obteniendo mezclas más dúctiles. No obstante, la mejora de la compatibilidad será clave para optimizar las propiedades de las mezclas.

## REFERENCIAS

[1] Martinez Villadiego;Arias Tapia;Useche;Escobar Macías. (2022). "Thermoplastic starch (TPS)/polylactic acid (PLA) blending methodologies: A review". *Journal of Polymers and the Environment, v.30*, n. 1, pp. 75-91. 10.1007/s10924-021-02207-1

[2] Plasencia;Arrieta;Lazaro-Hdez;Gomez-Caturla;Quiles-Carrillo. (2025). "Innovative development and characterization of thermoplastic zein-based biopolymers for food packaging via injection molding". *Food Hydrocolloids, v.163*, n., pp. 111134. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111134

[3] Taib;Rahman;Huda;Kuok;Hamdan;Bakri, . . . Khan. (2023). "A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer". *Polymer Bulletin, v.80*, n. 2, pp. 1179-1213. 10.1007/s00289-022-04160-y

[4] Wan;Lin;Tu. (2016). "Plasticizing effect of glyceryl tribenzoate, dipropylene glycol dibenzoate, and glyceryl triacetate on poly (lactic acid)". *Polymer Engineering & Science, v.56*, n. 12, pp. 1399-1406. https://doi.org/10.1002/pen.2437

# Plataforma de virtualización Proxmox con GNS3 como entorno de aprendizaje en asignaturas de Redes de Computadores

**Llinares Llopis, Raúl [1], Ferri Pascual, Josué [2], López Rodríguez, Daniel [3], Camacho García, Andrés [1], Igual García, Jorge [1]**

*(1) Departamento de Comunicaciones, Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, Alcoy, Alicante, 03801, España, R.L.L: rllinares@dcom.upv.es, A.C.G: acamacho@dcom.upv.es, J.I.G.: jigual@dcom.upv.es*

*(2) Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, Alcoy, Alicante, 03801, España, jferri@dsic.upv.es*

*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València (UPV), Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, Alcoy, Alicante, 03801, España, dalorod@dma.upv.es*

## RESUMEN

La enseñanza de Redes de Computadores requiere entornos de simulación lo más realistas posible. En este contexto, GNS3 ofrece una mayor potencia que los simuladores educativos tradicionales, proporcionando escenarios de trabajo mucho más similares a los que pueden encontrarse en el mundo profesional. Este trabajo describe una plataforma departamental de virtualización basada en Proxmox Virtual Environment (cuatro servidores HP DL360 Gen9 con almacenamiento local SAS SSD) que proporciona a cada estudiante una máquina virtual dedicada con GNS3, accesible 24/7 mediante VPN con autenticación multifactor (MFA). Se presenta la arquitectura del sistema y el flujo de acceso, junto con un cuestionario piloto tipo Likert (N=10) cuyos resultados reflejan una alta valoración del realismo, la disponibilidad y la utilidad del entorno para la formación y preparación profesional del alumnado.

**Palabras clave:** virtualización, Proxmox, GNS3, laboratorio virtual, redes de computadores, aprendizaje activo

## INTRODUCCIÓN

La enseñanza práctica de Redes de Computadores exige entornos donde los estudiantes configuren y analicen infraestructuras de red complejas. Los simuladores educativos de redes más extendidos, como Cisco Packet Tracer (PT), solo emulan dispositivos Cisco y carecen de sistemas operativos completos y captura de tráfico con fidelidad y herramientas reales. GNS3 (Graphical Network Simulator 3) supera estas limitaciones mediante virtualización completa de dispositivos, análisis de tráfico con Wireshark y conectividad a Internet [1, 2], pero requiere que el servidor —el componente que consume CPU, RAM y almacenamiento— resida en una máquina con recursos significativos, especialmente con escenarios con múltiples hosts y electrónica de red virtualizados. La solución es centralizarlo en una plataforma departamental accesible en remoto: los laboratorios virtuales y remotos en ingeniería permiten superar las restricciones de horario y aforo de las instalaciones físicas [3, 4], ofreciendo al estudiante un entorno disponible en cualquier momento y lugar, mientras que el cliente GNS3, ligero, se ejecuta en el portátil del alumno.

Con esta motivación, el Departamento de Comunicaciones de la Escola Politècnica Superior d'Alcoi (EPSA) de la Universitat Politècnica de València (UPV) tiene desplegada una plataforma de virtualización que proporciona a cada alumno una máquina virtual (VM) dedicada con GNS3 totalmente preconfigurado, accesible las 24

horas del día. La plataforma utiliza Proxmox Virtual Environment (PVE), solución de código abierto basada en Kernel-based Virtual Machine (KVM), con gestión web integrada e integración con el directorio institucional como base de datos de usuarios. Esta plataforma da soporte al Proyecto de Innovación y Mejora Educativa PIME/25-26/543 'Entorno de aprendizaje activo y constructivo para asignaturas de Redes de Computadores'. La presente comunicación describe la arquitectura de la plataforma, el flujo de acceso del estudiante y el impacto docente avalado por datos cuantitativos y cualitativos.

Las principales aportaciones de este trabajo son: (i) descripción de la arquitectura física y lógica y su operación docente, (ii) flujo de acceso seguro y aislamiento por alumno, y (iii) evidencia preliminar del impacto percibido por el alumnado.

## OBJETIVOS

Se presentan a continuación los objetivos de esta comunicación:

- Describir la arquitectura física y lógica de la plataforma basada en PVE (clúster, nodos, red, almacenamiento y criterios de operación).
- Justificar el dimensionamiento de los recursos (perfiles de Máquinas Virtuales (VM), concurrencia esperable y política de asignación y sobreaprovisionamiento).
- Documentar el flujo de acceso del estudiante y las medidas de aislamiento por alumno (VLAN/subred dedicada).
- Evidenciar el valor docente del enfoque frente a GNS3 en equipos personales y frente a simuladores como Packet Tracer, destacando elementos de realismo (sistemas operativos completos, capturas de tráfico, escenarios).
- Presentar la valoración del alumnado mediante resultados cuantitativos (cuestionario tipo Likert) y cualitativos (testimonios), y extraer líneas de mejora operativas.

## PLATAFORMA

### Infraestructura física

La plataforma se apoya en cuatro servidores HP DL360 Gen9 ubicados en un armario de la EPSA, protegidos por un firewall dedicado que gestiona las conexiones VPN entrantes, aplica políticas de filtrado y segmenta la plataforma del resto de la red universitaria. Cada servidor opera de forma autónoma en CPU, RAM y almacenamiento, con discos SAS SSD locales (sin almacenamiento compartido entre nodos), lo que simplifica la arquitectura y evita cuellos de botella en accesos concurrentes a disco. La capacidad conjunta del clúster es de 128 hilos (threads) x Intel ® Xeon ® CPU @ 3.20 GHz, 1 TB de RAM y 16 TB de almacenamiento, repartidos entre cuatro nodos.



**Figura 1.** Detalle de los cuatro servidores HP DL360 Gen9 y equipamiento de red (firewall arriba y switch 10GE abajo).

Sobre la plataforma física hay desplegado un PVE con los nodos (servidores) implementando un clúster gestionado desde una interfaz web unificada (tanto para alumnos como para profesores). Desde este entorno, el alumno accede únicamente a su VM, mientras que el profesor puede acceder a cualquier VM para supervisión, apoyo o corrección.

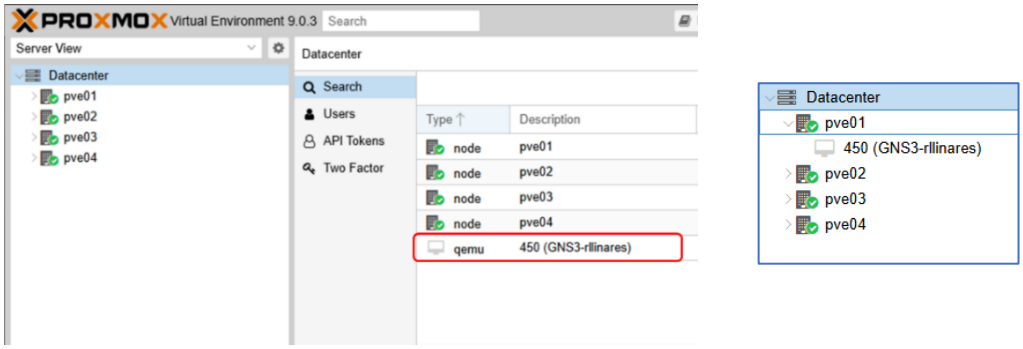



**Figura 2.** Interfaz web de PVE mostrando los nodos y una VM asignada a un alumno.

La configuración “estándar” por alumno asigna a cada VM 16 vCPU, 32 GB de RAM y 200 GB SSD. La plataforma da servicio a 60 alumnos por cuatrimestre. Se ha comprobado que, en periodos de entregas para evaluación, la máxima cantidad concurrente de alumnos oscila entre 15 y 20 alumnos y están casi equitativamente repartidos entre los cuatro nodos. Con 1 TB de RAM en el clúster, la plataforma permite 32 VMs simultáneas con 32 GB sin sobreaprovisionamiento de memoria. Puesto que el sobreaprovisionamiento se limita principalmente a CPU, se ha analizado su rendimiento en periodos de carga, observando un funcionamiento con un grado de degradación aceptable. Se advierte a todos los estudiantes que realicen copias de seguridad de la configuración de cada Project en GNS3 que vayan implementando y que eviten, en la medida de lo posible, trabajar en momentos previos a las entregas. Como no todos los alumnos apagan sus VM, el sistema las apaga todas las noches para optimizar recursos mediante una tarea programada.

Los escenarios docentes auténticos provienen de (i) la ejecución de sistemas operativos e imágenes de red reales (routers/switches, firewalls, servidores Linux y, cuando procede, entornos Windows con licenciamiento adecuado), y (ii) la captura y análisis de tráfico con Wireshark sobre interfaces virtuales. Además, la conectividad a Internet desde las VMs (mediante NAT/filtrado) habilita escenarios profesionales de routing, ACL, VPN y troubleshooting con un grado de fidelidad superior al de simuladores puramente educativos. Todo ello permite escenarios realistas que, por limitaciones del software no pueden implementarse en PT ni, por limitaciones de los recursos del equipo personal del alumnado, podrían ejecutarse con GNS3 instalado en local en el PC de cada alumno.

## Arquitectura lógica, segmentación por alumno y flujo de acceso

Cada estudiante tiene asignada una VM en uno de los nodos. La VM reside en una VLAN exclusiva por alumno (con su subred IP privada asociada), lo que garantiza el aislamiento entre entornos (sin visibilidad lateral entre alumnos) y facilita la monitorización docente. Para el acceso a cada VM se utilizan las credenciales de la Universidad de las que dispone cada alumno (tanto para el acceso VPN como para el acceso a PVE).

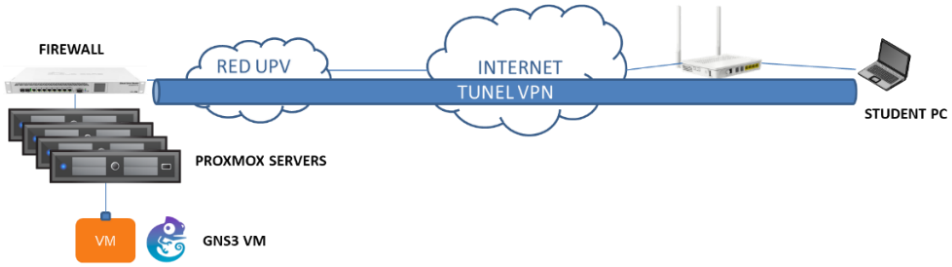



**Figura 3.** Esquema lógico: VM por alumno, nodos PVE, firewall y acceso VPN.

El flujo de acceso consta de tres pasos. Primero, el alumno establece una conexión VPN mediante Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP) con autenticación multifactor (MFA) a través del firewall departamental. Un script de PowerShell para Windows disponible en la plataforma docente de la UPV (PoliformaT) automatiza la creación de la conexión y las rutas necesarias, evitando configuración manual. Segundo, accede a la interfaz web de PVE con sus credenciales institucionales para arrancar su VM. Tercero, lanza el cliente GNS3 en su equipo local y se conecta al servidor GNS3 de la VM, disponiendo de un entorno operativo con acceso a Internet desde cualquier lugar y equipo compatible (Windows, macOS o Linux, para estos dos últimos se dispone de plantilla de script a adaptar a la versión de sistema operativo de cada alumno).

## RESULTADOS Y VALORACIÓN DEL ALUMNADO

### Cuestionarios Likert alumnado

Al finalizar el curso 2025-26 se administró un cuestionario piloto anónimo (N=10, escala Likert 1–5, 1=totalmente en desacuerdo, 5=totalmente de acuerdo) para valorar el entorno virtual y la percepción global de la metodología docente que este permite utilizar.

**Tabla 1.** Valoración del entorno virtual (N=10, escala 1–5, 1=TD, 5=TA).

| Ítem | Media | SD |
|---|---|---|
| El entorno virtual fue fácil de acceder desde cualquier lugar y dispositivo. | 4,00 | 0,94 |
| La disponibilidad 24/7 me permitió organizar mejor mi tiempo de estudio. | 4,40 | 0,70 |
| El entorno incrementó mi motivación para aprender redes frente a Packet Tracer. | 4,50 | 0,71 |
| El realismo del entorno virtual se asemeja al mundo profesional. | 4,80 | 0,42 |
| El entorno me proporcionó los recursos necesarios para el trabajo autónomo. | 4,70 | 0,67 |

**Tabla 2.** Percepción global de la metodología con GNS3 (N=10, escala 1–5, 1=TD, 5=TA).

| Ítem | Media | SD |
|---|---|---|
| La práctica con GNS3 en clase me permitió comprender mejor los principios teóricos. | 4,90 | 0,32 |
| Esta metodología es más útil que preparar un examen tradicional. | 4,80 | 0,63 |
| Me siento más seguro para aplicar estos conocimientos en entornos reales. | 4,60 | 0,52 |
| La metodología ha mejorado mi comprensión global de Redes. | 4,90 | 0,32 |
| Estoy satisfecho/a con la metodología. | 4,70 | 0,67 |

Los resultados muestran una valoración alta en ambos bloques. En el entorno virtual (Tabla 1) destacan el realismo profesional (M=4,80; SD=0,42) y la percepción de disponer de recursos suficientes para el trabajo autónomo (M=4,70; SD=0,67), junto con la disponibilidad 24/7 (M=4,40; SD=0,70). En la metodología (Tabla 2), los ítems relacionados con la comprensión de los principios teóricos y la comprensión global de la asignatura alcanzan las puntuaciones más altas (M=4,90; SD=0,32). El acceso desde cualquier lugar y dispositivo (M=4,00; SD=0,94) es el ítem con mayor variabilidad, coherente con una curva de aprendizaje inicial de configuración de la VPN mitigada mediante el script de automatización.

**Testimonios cualitativos del alumnado**

Los comentarios abiertos recogidos en el cuestionario convergen en tres dimensiones: disponibilidad 24/7, realismo profesional y superioridad percibida frente a Packet Tracer.

***Alumno 1:*** *"El servicio 24/7 es muy útil ya que se ha podido trabajar siempre que se ha necesitado y desde donde se ha querido. El uso del GNS3 nos ha proporcionado una sensación más cercana a la realidad y te ayuda a comprender muchísimos más conceptos teóricos de forma práctica."*

***Alumno 2:*** *"El GNS3 es sin duda una mejora significativa con respecto al uso del Packet Tracer en años anteriores, en combinación con Wireshark plantea una mejora y permite seguir, plantear y trabajar a un ritmo más rápido y de una forma más cómoda."*

***Alumno 3:*** *"GNS3 nos ofrece un entorno muy profesional y acorde con la realidad: podemos diseñar, configurar y probar topologías de red complejas sin necesidad de hardware físico. Tener este servicio disponible en todo momento es algo casi imprescindible."*

***Alumno 4:*** *"Considero una gran ventaja el hecho de que todos podamos conectarnos a un servidor con los recursos suficientes para realizar trabajos más complejos y con aplicación real, que serían difícilmente realizables con los recursos de cada alumno."*

***Alumno 5:*** *"GNS3 ha resultado increíblemente útil para saber a lo que nos vamos a enfrentar cuando salgamos al mundo laboral, ya que otros medios como Packet Tracer no ofrecen esta variedad a la hora de añadir recursos y poder entrar a ellos de forma tan realista."*

***Alumno 6:*** *"El entorno ha dado problemas pero todo problema tiene solución; se podría mejorar el acceso a él para que fuera más rápido. La verdad que si esta metodología le ha funcionado durante años creo que no necesita mejorar nada."*

## DISCUSIÓN

Los datos cuantitativos y cualitativos convergen en señalar la plataforma de virtualización como componente clave del aprendizaje según la evidencia preliminar. La disponibilidad 24/7 conecta con el principio de entorno de aprendizaje activo de Wilson [5]: un espacio donde el estudiante puede explorar y construir comprensión a su ritmo. La asignación individual de una VM por alumno elimina la pasividad del trabajo en grupo y garantiza un aprendizaje completo e individual (PIME/25-26/543, UPV).

La diferencia entre virtualización (GNS3/Proxmox) y emulación (Packet Tracer) es percibida como significativa: trabajar con imágenes reales de dispositivos, sistemas operativos completos y captura de tráfico en tiempo real genera una experiencia que el alumnado asocia directamente con el entorno profesional [6]. El ítem de acceso (M=4,00; SD=0,94) refleja la curva de aprendizaje de la VPN, cuya automatización mediante script es una línea de mejora ya en curso.

La arquitectura standalone de almacenamiento evita los cuellos de botella de rendimiento detectados en configuraciones centralizadas, especialmente en períodos de uso concurrente. Como limitación, la plataforma de PVE no balancea los usuarios entre nodos y, por tanto, en momentos de concurrencia pueden aparecer nodos ligeramente más cargados que otros, aunque en ninguna ocasión esto ha causado un problema.

## CONCLUSIONES

La plataforma departamental basada en Proxmox VE permite asignar a cada estudiante una VM dedicada con recursos suficientes, habilitando topologías y cargas de trabajo (routers/switches, firewalls, sistemas operativos completos y análisis de tráfico) difícilmente viables en portátiles. El acceso 24/7 mediante VPN con MFA, junto con el aislamiento por alumno (VLAN/subred dedicada), sostiene un modelo de aprendizaje activo y autónomo, con supervisión docente directa cuando es necesario.

Los resultados del cuestionario piloto (N=10) muestran una valoración global alta: en el bloque del entorno virtual destacan el realismo profesional (M=4,80) y la percepción de recursos suficientes (M=4,70), mientras que en el bloque metodológico sobresalen la mejora en la comprensión de principios teóricos y de la asignatura (M=4,90). La principal fricción identificada es la configuración inicial de la VPN (M=4,00; SD=0,94), mitigada mediante un script de automatización y susceptible de seguir mejorando (onboarding más guiado y optimización en picos de concurrencia). En conjunto, la solución es transferible a otras asignaturas que requieran laboratorios de red complejos y resulta especialmente adecuada en entornos con restricciones presupuestarias por el uso de software de virtualización de licencia libre.

## REFERENCIAS

[1] García Gómez, Gabriel J.; Gil Vázquez, Pablo; Candelas Herías, Francisco A.; Blanes Payá, María José; Baquero Crespo, Miguel Ángel; Alacid Soto, Beatriz; Torres Murcia, Alberto (2015). "Virtualización de Redes de Computadores con GNS3: Evaluación de soluciones para el aprendizaje a distancia". En: XIII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria: nuevas estrategias organizativas y metodológicas en la formación universitaria para responder a la necesidad de adaptación y cambio, p.p. 1343-1356.

[2] Gil, Pablo; Garcia, Gabriel J.; Delgado, Angel; Medina, Rosa M.; Calderon, Antonio; Marti, Patricia (2014). "Computer Networks Virtualization with GNS3: Evaluating a solution to optimize resources and achieve a distance learning". En: 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), p.p. 2141-2144. http://dx.doi.org/10.1109/FIE.2014.7044343

[3] Nedic, Zorica; Machotka, Jan; Nafalski, Andrew (2003). "Remote laboratories versus virtual and real laboratories". En: Proceedings of the 33rd Annual Frontiers in Education Conference (FIE 2003), v. 1, p.p. T3E-1–T3E-6. http://dx.doi.org/10.1109/FIE.2003.1263343

[4] Balamuralithara, Balakrishnan; Woods, Peter Charles (2009). "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab". Computer Applications in Engineering Education, v. 17, n. 1, p.p. 108-118. http://dx.doi.org/10.1002/cae.20186

[5] Wilson, Brent G. (Ed.) (1996). Constructivist learning environments: case studies in instructional design. Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications. ISBN: 0 87778 290 3

[6] Prince, Michael J. (2004). "Does active learning work? A review of the research". Journal of Engineering Education, v. 93, n. 3, p.p. 223-231. http://dx.doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x

# Prototipado digital 3D. Metodología de medición sobre gemelos digitales

**Morales Morales, Rafaela[1,2], Macías González, Raquel [3]**

**(1)** *Facultat Belles Arts, Universitat Politécnica de València, Camí de Vera, s/n.46022, València. E-mail: ramomo@alumni.upv.es*

**(2)** *EASD València, C/ Pintor Domingo, 20. 46001, València. E-mail: rmorales@easdvalencia.com*

*(3) EASD València, C/ Pintor Domingo, 20. 46001, València. E-mail: rmacias@easdvalencia.com*

## RESUMEN

El presente trabajo explora el prototipado 3D aplicado a la moda digital centrándose en los procesos de fitting o prueba de ajuste de las prendas.

El objetivo principal es desarrollar una metodología de medición digital de prendas que permita trasladar al entorno virtual las técnicas de medición tradicionales sobre avatares tridimensionales y validar el uso de avatares reales durante el proceso.

Para ello se han utilizado gemelos digitales escaneados a partir de cuerpos reales (aportados por el Instituto de Biomecánica de Valencia IBV) y se han medido las holguras de un conjunto de prendas de una empresa colaboradora.

Se ha elaborado una tabla que recoge el procedimiento de mediciones habitual para la comprobación del ajuste de prendas o fitting y se ha adaptado a las herramientas de medición digitales disponibles en el software seleccionado para el estudio. Paralelamente, se han trasladado las medidas de los avatares escaneados sobre avatares propios del software, generando así los gemelos digitales que permiten comparar las medidas tomadas en los mismos puntos anatómicos.

Los resultados obtenidos validan el uso de herramientas digitales de medición para el fitting de las prendas y evidencian algunas diferencias sustanciales entre medidas concretas debido a la morfología no normativa de los cuerpos, manifestando la relevancia del uso de avatares reales en los procesos de ajuste de prendas.

**Palabras clave:** fitting digital; gemelos digitales; moda digital; morfología no normativa

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la formación del diseño de moda ha experimentado una importante transformación digital gracias a la incorporación de herramientas de diseño y simulación 3D. Actualmente, muchos de los procesos relacionados con el desarrollo de prendas pueden realizarse en entornos virtuales mediante softwares que incorporan avatares digitales y sistemas de simulación textil. Esto permite visualizar cómo se comporta una prenda sobre el cuerpo sin necesidad de la elaboración de prototipos físicos.

Dentro de estos entornos digitales, el *fitting* o ajuste virtual se ha convertido en uno de los aspectos de mayor interés por desarrollar sistemas de medición digital que reproduzcan los procesos tradicionales utilizados en patronaje y confección. Estudios recientes señalan que todavía existe una brecha entre la comprensión de patrones convencional y las simulaciones digitales. En los métodos convencionales, las tablas

de medidas y las comprobaciones de holguras se realizan directamente sobre el cuerpo o sobre la prenda física mediante cintas métricas y puntos de referencia concretos. Trasladar este procedimiento al entorno digital implica adaptar estas metodologías a los sistemas de patronaje CAD y simulación 3D y a las herramientas de medición presentes en los softwares, manteniendo una lógica de trabajo comparable a la utilizada tradicionalmente en moda.

Uno de los indicadores más directos del ajuste entre prenda y cuerpo es la holgura. Se trata de un exceso que se puede añadir a una medida anatómica determinada para generar un mayor volumen de la prenda. Si una prenda se realizara exclusivamente con las medidas anatómicas no se podría vestir, es necesario añadir holguras, teniendo en cuenta los materiales usados. Las holguras permiten comprobar el tallaje y ajustar el volumen de las prendas para mejorar el movimiento y diseño.

Otro elemento fundamental para la validación del fitting digital son los avatares 3D. Muchos programas de simulación incorporan avatares estándar creados a partir de medidas genéricas, que permiten trabajar de forma rápida dentro del software. Sin embargo, los avatares escaneados a partir de personas reales o gemelos digitales ofrecen representaciones corporales más cercanas a la diversidad física real, incorporando morfologías no normativas.

A diferencia de los avatares predeterminados, los avatares escaneados conservan características propias del cuerpo humano, como pequeñas asimetrías, variaciones posturales o distribuciones específicas de volumen corporal. Estas diferencias pueden influir directamente en el comportamiento de la prenda y en aspectos relacionados con el ajuste, las tensiones del tejido o las holguras generadas entre el cuerpo y la prenda.

Por ello, desarrollar una metodología digital de mediciones sobre gemelos digitales puede ser relevante en el ámbito educativo porque permite formar al alumnado en el uso de tecnologías y procesos digitales cada vez más presentes en la industria de la moda, además de promover la diversidad al trabajar con cuerpos morfológicamente distintos, lejos de los estándares visuales. También, esta metodología puede contribuir a establecer una relación coherente entre las técnicas tradicionales de patronaje y medición y las nuevas herramientas digitales de simulación 3D.

## OBJETIVOS

El objetivo principal es desarrollar una metodología de medición digital de prendas que permita al usuario trasladar al entorno virtual las técnicas de medición tradicionales sobre avatares tridimensionales y validar el uso de avatares reales durante el proceso.

A partir de este planteamiento general se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar los principales sistemas de patronaje digital y simulación 3D aplicados al diseño de moda. Detallar las herramientas disponibles del software seleccionado.
2. Describir la metodología tradicional de mediciones de holguras.
3. Medir las holguras de los patrones sobre los gemelos digitales, reales y su homólogo predeterminado.

## METODOLOGÍA

En el estudio se utilizaron los patrones de un pijama de la empresa Yedimar y los avatares digitalizados a partir de personas reales aportados por el IBV.

Las mediciones se efectuaron sobre los avatares reales y su réplica en el avatar predeterminado del software. Para ello se trasladaron las medidas principales de los originales sobre un avatar predeterminado, generando así su gemelo.

En cuanto a las prendas se utilizó el sistema de escalado automatizado del software para escalar la talla aportada por la empresa y poder tomar medidas sobre diferentes individuos.

Con el fin de que las mediciones tradicionales sean comparables a las digitales se tuvieron en cuenta estos aspectos:

- Realizar una correcta interpretación de las posturas tradicionales y digitales
- Medir usando los mismos puntos anatómicos

Los avatares predeterminados establecen estos puntos en una posición dada por las relaciones entre medidas. Los avatares escaneados incluyen una marca visible en los puntos de medición correspondientes con diferentes zonas del cuerpo, base del cuello, hombro, pecho, etc.

Finalmente se escanearon los avatares en 3 poses distintas que permitieron replicar la metodología tradicional. Pose A, con los brazos y las piernas ligeramente abiertos, pose T, brazos en cruz y pose R (relax), piernas y brazos cerrados. En el caso de los gemelos predeterminados cuentan con un esqueleto que se puede modificar para adoptar la pose deseada.

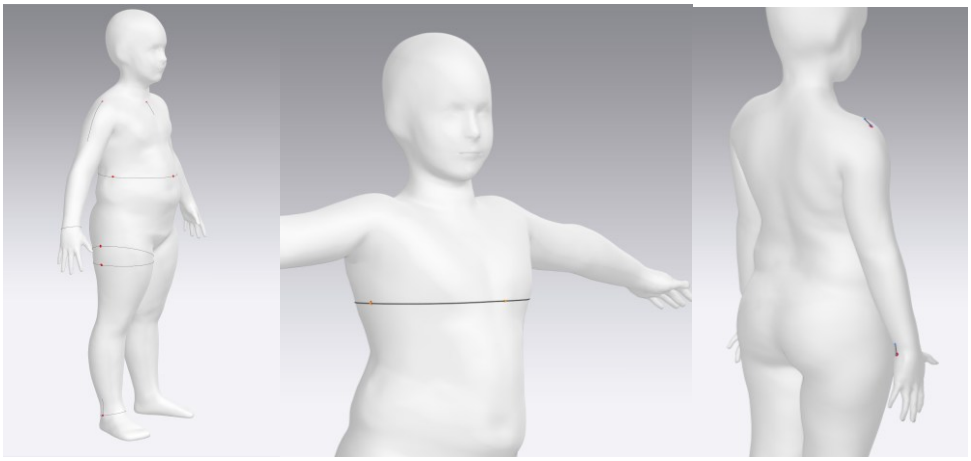


**Figura 1**. Marcadores sobre avatar en todas las poses escaneadas, A, T y R.

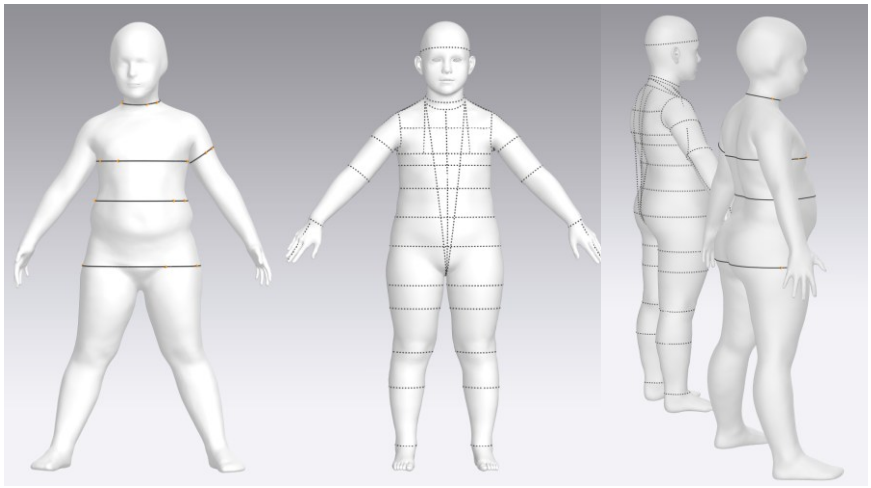


**Figura 2**. Gemelos digitales en pose A con marcadores.

Inicialmente se analizan las herramientas que ofrece el software y que posibilitan hacer mediciones sobre las prendas. Por un lado dispone de herramientas de medición de longitud lineal y longitud de circunferencia (Herramienta Medida lineal y Medida de circunferencia). Ambas son óptimas para el estudio, sin embargo, la longitud de circunferencia solo se efectúa en un plano, dificultando la mediciones en algunas situaciones.

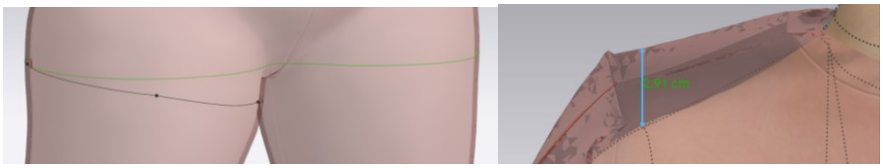


**Figura 3.** Herramientas utilizadas: medida lineal, medida de circunferencia, lápiz 3D y alfileres.

Se analizó la herramienta Lápiz 3D sobre modelo, que permite trazar líneas en cualquier dirección sobre las prendas ajustadas en el avatar, ofreciendo una mayor precisión en el trazado de la curva de medición.

Por otro lado también se utiliza una de las herramientas que ofrece el programa para efectuar las mediciones del pecho, brazo y sisa sobre la camiseta. Los alfileres permiten sujetar la prenda en un punto determinado para estirarla y medir el sobrante. Aunque es un sistema que ofrece más dificultades digitalmente que el del lápiz 3D se acerca más a la medición empleada en la realidad.

Para la elaboración de la tabla se traslada la metodología empleada en las mediciones reales a las posibilidades que ofrecen las herramientas de medición digital. Se especifican las holguras a medir, con referencias en las prendas y las medidas digitales, así como el valor final.

**Tabla 1.** Tabla base para mediciones digitales.

| Sujeto | | Silueta | | | Prenda | Talla |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre avatar | | Masculino/femenino/unisex | | | Camiseta | x |
| **Holgura** | **Pose** | **Ref. prenda** | **Marcador** | **Ref. medida** | **Imagen** | **Valor cm** |
| Escote | A | Costura cuello | Supraesternal | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |
| Pecho | T | Costura lateral | Tórax | L_lineal<br>-Medida lineal modelo<br>-Alfiler | | |
| Hombros | R | Costura del hombro | Acromion | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |
| Sisa | A | Costura sisa | Acromion | L_lineal<br>-Medida lineal modelo<br>-Alfiler | | |
| Brazo | A | Costura lateral manga | Biceps | L_lineal<br>-Medida lineal modelo<br>-Alfiler | | |
| Largo de manga | R | Costura puño | Estilión | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |
| Largo de camiseta | A | Extremo inferior | Cadera | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |

| Sujeto | | Silueta | | | Prenda | Talla |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre avatar | | Masculino/femenino/unisex | | | Pantalón | x |
| **Holgura** | **Pose** | **Ref. prenda** | **Marcador** | **Ref. medida** | **Imagen** | **Valor cm** |
| Cintura | A | Contorno superior | Cintura lateral | L_circunferencia<br>-Lápiz 3D modelo | | |
| Cadera | A | Contorno | Cadera | L_circunferencia<br>-Lápiz 3D modelo<br>-Medida circ. modelo | | |
| Muslo | A | Contorno | Muslo base | L_circunferencia<br>-Lápiz 3D modelo | | |
| Tobillo | A | Contorno inferior | Contorno tobillo | L_circunferencia<br>-Lápiz 3D modelo | | |
| Tiro delantero | A | Extremo superior delantero | Centro cintura | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |
| Tiro trasero | A | Extremo superior trasero | Centro cintura | L_lineal<br>-Medida lineal modelo<br>-Lápiz 3D avatar | | |
| Largo de pantalón | A | Extremo inferior | Articulación tobillo | L_lineal<br>-Medida lineal modelo | | |

## RESULTADOS

Se realizaron mediciones de la parte superior e inferior de un pijama sobre 10 avatares, 5 reales y sus gemelos digitales correspondientes.

Se encontraron discrepancias recurrentes en las medidas de sisa, hombro y largo de manga. Estas zonas estan relacionadas con la geometría del tronco superior y la posición de los hombros. En cuanto a la parte inferior las diferencias más significativas se dan en los tiros delantero y trasero que son zonas muy sensibles a diferencias morfológicas. Se pudieron observar desigualdades en la curvatura lumbar y en la distribución de volúmenes en los cuerpos.

Los resultados sugieren que el avatar digital adaptado del software reproduce adecuadamente las dimensiones de contorno principales (pecho, cintura, cadera), pero

presenta limitaciones para representar con precisión la morfología real de hombros, sisa y proporciones verticales.

**Tabla 2.** Comparativa de mediciones digitales.

| Avatar 003 Camiseta T.6 | | | | Avatar 002 Camiseta T.8 | | | Avatar 003 Pantalón T.6 | | | | Avatar 002 Pantalón T.8 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Medida** | **Digi.** | **Real** | **Diferencia** | **Digi.** | **Real** | **Diferencia** | **Medida** | **Digi.** | **Real** | **Diferencia** | **Digi.** | **Real** | **Diferencia** |
| Escote | 0,66 | -0,46 | 1,12 | -0,82 | -1,37 | 0,55 | Cintura | 9,87 | 2,58 | 7,29 | 20,51 | 20,51 | 0 |
| Pecho | 2,93 | 2,96 | 0,03 | 0 | 0 | 0 | Cadera | 8,55 | 6,38 | 2,17 | 13,71 | 16,80 | -3,09 |
| Hombro | 0,26 | -0,59 | 0,85 | 0,56 | -0,28 | 0,84 | Muslo | 4,14 | 1,06 | 3,08 | 9,00 | 12,05 | -3,05 |
| Sisa | 4,24 | 1,87 | 2,37 | 2,91 | 1,21 | 1,70 | Tobillo | 2,66 | 3,81 | -1,15 | 5,34 | 5,71 | -0,37 |
| Brazo | 4,12 | 4,26 | 0,14 | 0,95 | 1,91 | 0,96 | Tiro del. | -3,72 | -0,76 | -2,96 | 5,89 | -4,41 | 10,30 |
| Largo M. | -0,98 | -1,88 | 0,90 | 1,55 | 0,55 | 1,00 | Tiro tras. | 0,28 | -1,46 | 1,74 | 2,48 | -1,65 | 4,13 |
| Largo C. | -2,63 | -2,08 | 0,55 | -3,00 | -4,90 | 1,90 | Largo P. | -1,59 | -0,96 | -0,63 | 0,52 | -1,40 | 1,92 |

## CONCLUSIONES

De manera general, los resultados sugieren que el software 3D puede resultar una herramienta precisa y eficaz para la validación y prueba virtual de prendas sin necesidad de disponer físicamente de la persona usuaria.

La elaboración de la tabla base para mediciones digitales ha permitido desarrollar un sistema estructurado para trasladar los métodos convencionales a las técnicas propias de entornos 3D, detallando las herramientas que se pueden usar en cada tipo de medida. Esto facilita la obtención de datos precisos que se pueden trasladar al patrón 2D en todos los casos, para poder efectuar las labores de ajuste sobre los patrones.

Al trasladar las medidas obtenidas de los avatares escaneados a los avatares preestablecidos del software, se aprecian diferencias significativas en la estructura corporal de ambos modelos. Estas variaciones se observan especialmente en aspectos como la posición de los hombros, la amplitud de la caja torácica en las poses A y T, así como en la curvatura de la espalda y la distribución de volúmenes en aquellos avatares que presentan morfologías alejadas de los estándares corporales habituales. Aunque estas diferencias no afectan de manera uniforme a todas las mediciones realizadas, sí evidencian que las proporciones y particularidades anatómicas de cada cuerpo influyen directamente en el comportamiento y ajuste de las prendas simuladas.

Aunque los avatares paramétricos adaptados pueden reproducir con precisión muchas medidas corporales, los gemelos digitales escaneados parecen representar mejor las características morfológicas que afectan al ajuste de las prendas.

Este artículo se ha desarrollado en el marco del Programa de Doctorado en Arte: Producción e investigación de la Universidad Politécnica de València. La autora expresa su agradecimiento a su directora de tesis la Dra. Núria Lloret Romero por su apoyo y tutela.

# Films biodegradables de PLA reciclado/TPS a partir de residuos de impresión 3D: optimización del procesado y aplicaciones potenciales como matrices para quantum dots

**Calderón, Fabricio[(1)], de la Rosa-Ramírez, Harrison[(2)], López-Martínez Juan[(2)], Pavón, Cristina[(2)]**

*(1) Escuela de Ciencia E Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Calle 15, Cartago, 30109 Dulce Nombre, fcalderon40634@estudiantec.cr*

*(2) Instituto Universitario de Investigación de Tecnología de los Materiales, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy.*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la revalorización de estos residuos mediante su reprocesado por extrusión y formulación en mezclas biodegradables con almidón termoplástico (TPS), con el objetivo de obtener films delgados y optimizar las condiciones de procesado. Se evaluaron seis formulaciones combinando dos variantes de TPS (con estearato de magnesio (F.A) y con estearato de magnesio y ácido cítrico como compatibilizante (F.B)) a tres composiciones PLA/TPS (90/10, 80/20 y 70/30% p/p). La optimización del perfil de temperatura identificó las condiciones 160-180-177-169 ºC como las más adecuadas para obtener films continuos y homogéneos. Las mezclas con F.B a contenidos de TPS del 10–20% presentaron el mejor balance entre procesabilidad, propiedades mecánicas y continuidad estructural, evidenciando el papel del ácido cítrico como compatibilizante interfacial. Las características superficiales y ópticas de los films obtenidos abren perspectivas para su uso como matrices poliméricas para quantum dots en el desarrollo de dispositivos fotónicos flexibles y sostenibles.

**Palabras clave:** PLA reciclado, almidón termoplástico, impresión 3D, optimización de procesado, films biodegradables, quantum dots, economía circular.

## INTRODUCCIÓN

La impresión 3D por FDM ha consolidado el PLA como termoplástico biodegradable de referencia en prototipado, educación e investigación. Sin embargo, el volumen creciente de residuos generados (soportes, piezas fallidas y restos de filamento) contrasta con el carácter renovable del material y los principios de economía circular [1].

Su revalorización mediante extrusión, combinada con almidón termoplástico (TPS), permite desarrollar mezclas biodegradables de propiedades ajustables. Este tipo de matrices ha suscitado interés como soporte para quantum dots (QDs), nanocristales semiconductores con propiedades ópticas únicas, con aplicaciones en sensado, embalaje activo y fotónica sostenible [2]. No obstante, la inmiscibilidad termodinámica entre el PLA y el almidón exige el uso de agentes compatibilizantes (como el ácido cítrico) para mejorar la adhesión interfacial y garantizar una matriz continua y homogénea apta para dispersar estos nanomateriales [3].

Este trabajo presenta la optimización del procesado de films biodegradables a partir de mezclas de PLA reciclado de impresión 3D y TPS plastificado, evaluando el efecto de la composición y la compatibilización sobre sus propiedades mecánicas y superficiales, y

discutiendo su potencial como matrices para QDs en materiales fotónicos flexibles de bajo impacto ambiental.

## OBJETIVOS

Valorizar residuos de PLA de impresión 3D FDM mediante su reprocesado en mezclas biodegradables con TPS, optimizando las condiciones de procesado y el efecto de la compatibilización con ácido cítrico sobre las propiedades de los films resultantes, y explorar su potencial como matrices para quantum dots en aplicaciones fotónicas sostenibles.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Para la fabricación del TPS se empleó almidón de maíz comercial (InterStarch, tamaño de partícula 25–50 µm), glicerol de grado analítico (99%, Thermo Scientific), agua osmotizada, estearato de magnesio y ácido cítrico (ambos Sigma-Aldrich). El PLA procedió de residuos de impresión 3D del laboratorio de Fabricación 'FabLab' de la UPV.

### Preparación del TPS y formulaciones PLA/TPS

La formulación base del TPS se estableció en 65/25/10% p/p (almidón/glicerol/agua), aplicando un factor de corrección por la humedad intrínseca del almidón en cada lote. Se prepararon dos variantes: Formulación A (F.A), con estearato de magnesio (0,5 phr), y Formulación B (F.B), con estearato de magnesio (0,5 phr) y ácido cítrico (1 phr) como compatibilizante.

Los residuos de PLA se homogeneizaron por extrusión (175-180-175-150 ºC) y se mezclaron con cada variante de TPS en una extrusora de doble tornillo co-rotativa (Dupra S.L., Alicante) con perfil 175-180-175-155 ºC, evaluando tres composiciones PLA/TPS: 90/10, 80/20 y 70/30% p/p (Tabla 1).

**Tabla 1.** Formulaciones de PLA/TPS.

| Formulación | PLA (% p/p) | TPS F.A (% p/p) | TPS F.B (% p/p) |
|---|---|---|---|
| PLA(90)+F.A(10) | 90 | 10 | - |
| PLA(80)+F.A(20) | 80 | 20 | - |
| PLA(70)+F.A(30) | 70 | 30 | - |
| PLA(90)+F.B(10) | 90 | - | 10 |
| PLA(80)+F.B(20) | 80 | - | 20 |
| PLA(70)+F.B(30) | 70 | - | 30 |

### Procesado de films

Los pellets resultantes se procesaron como películas delgadas mediante un micromezclador Xplore MC 15 HT acoplado al sistema Cast Film Pro Line (CFPL 65). Se evaluaron tres perfiles de temperatura: a) 160-168-169-157 ºC, b) 160-177-175-169 ºC y c) 160-180-177-169 ºC, seleccionándose el perfil óptimo en función de la homogeneidad y calidad superficial del film obtenido.

### Caracterización

Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante ensayo de tracción según UNE-ISO 527-2. La humectabilidad superficial se determinó por medición del ángulo de contacto con agua mediante goniómetro Krüss, con jeringa micrométrica y cámara CCD Toshiba Teli, promediando cinco mediciones por muestra en tres muestras por formulación.

## RESULTADOS

### Revalorización del PLA procedente de residuos de impresión 3D

Los residuos de PLA de impresión 3D presentaron un contenido de impurezas inferior al 2%, confirmando su viabilidad como materia prima para reprocesado por extrusión. Tras el mezclado con perfil de temperaturas 175-180-175-150 °C, los films mostraron superficie homogénea y brillante, sin burbujas ni irregularidades apreciables (Figura 1), lo que permite su reintroducción en cadenas productivas sin etapas de purificación intensiva.



**Figura 1.** a) Restos de impresión 3D con PLA, TPS, TPS-AC y b) Restos de impresión 3D mezclados mediante extrusión.

### Optimización del procesado de las mezclas PLA reciclado/TPS

La incorporación de TPS requirió un ajuste sistemático de formulaciones y parámetros de procesado. Las formulaciones con estearato de magnesio únicamente (F.A) mostraron irregularidades superficiales acentuadas al aumentar el contenido de TPS, mientras que la incorporación de ácido cítrico (F.B) mejoró notablemente la homogeneidad y procesabilidad, atribuible a las interacciones favorables en la interfase PLA-almidón (Figura 2). Estos resultados orientan hacia F.B con 10–20% de TPS como configuración de partida para futuras optimizaciones.




**Figura 2.** Restos de impresión 3D con PLA, TPS, TPS-AC.

### Determinación de las condiciones óptimas de producción de films

La obtención de películas delgadas puso de manifiesto la influencia crítica del perfil de temperatura en la calidad del film. El perfil más bajo (160-168-169-157 ºC) generó películas con exceso de material en bordes y presencia de agujeros, indicativo de una viscosidad en fundido demasiado elevada que impide una distribución uniforme durante el laminado. El perfil intermedio (160-177-175-169 ºC) mejoró la homogeneidad de espesor, aunque persistieron fenómenos de separación de fases y presencia de partículas sin fundir completamente. El perfil superior (160-180-177-169 ºC) produjo las películas más homogéneas, con menor exceso de borde y mayor fluidez del fundido, estableciéndose como el perfil óptimo para la obtención de films de estas mezclas (Figura 3).

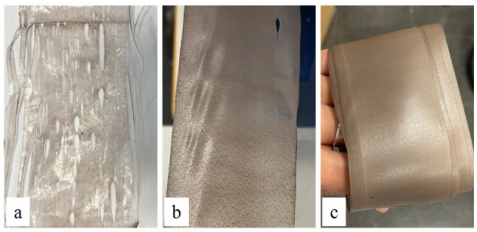



**Figura 3.** Pruebas de producción de películas Perfiles de temperatura a) 160-168-169-157 ºC, b) 160-177-175-169 ºC, y c) 160-180-177-169 ºC.

En cuanto al efecto de la composición, las mezclas con F.A mostraron una degradación progresiva de la calidad del film al aumentar el contenido de TPS, llegando a estructuras discontinuas e incompatibles al 30% (Figura 4d). Las mezclas con F.B presentaron una mejora significativa en la continuidad del film, especialmente a contenidos de 10% y 20% de TPS, donde se observó material continuo con dispersión limitada de fase inmiscible. Al 30% de TPS con F.B, aunque aumentó la opacidad, se mantuvo la continuidad estructural del film (Figura 4g), lo que evidencia el efecto compatibilizante del ácido cítrico incluso en proporciones elevadas de TPS.

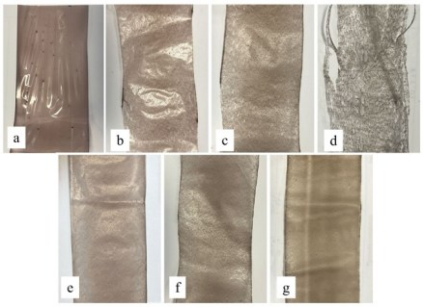



**Figura 4.** Pruebas de producción de películas a) PLA reciclado, b-d) mezclas con F.A, contenidos de TPS de 10 %, 20 % y 30 % en peso, respectivamente, e–g) Mezclas con F.B, con contenidos de TPS de 10 %, 20 % y 30 % en peso, respectivamente.

### Caracterización mecánica y superficial de los films

El PLA reciclado puro exhibió los valores más elevados de resistencia a la tracción (~37-40 MPa) y alargamiento a la rotura (~8,85%), coherentes con la literatura para PLA reciclado mecánicamente, cuyas propiedades se ven reducidas respecto al material virgen como consecuencia de la degradación de cadenas durante el reprocesado [4]. La incorporación de TPS redujo la resistencia a valores en torno a 15-17 MPa en ambas formulaciones, comportamiento atribuible a la inmiscibilidad termodinámica PLA-

almidón, que genera interfaces débiles actuando como concentradoras de tensiones (Figura 5).

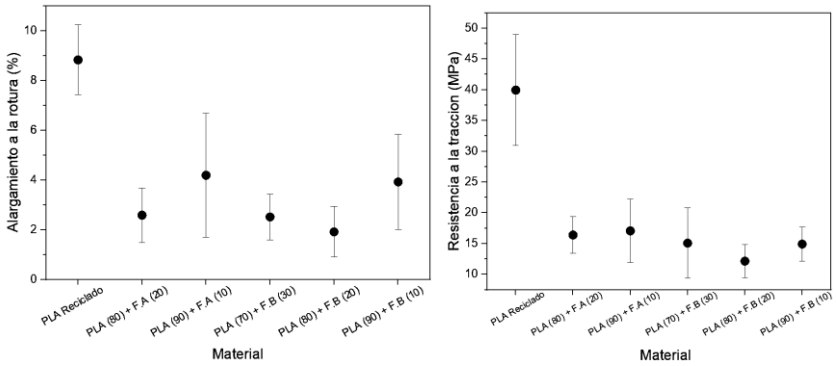



**Figura 5.** Gráficos comparativos de propiedades de tracción de películas delgadas de PLA y sus mezclas con TPS a) Alargamiento a la rotura b) resistencia a la tracción.

Aunque la formulación B no mejoró estadísticamente la resistencia a la tracción respecto a A, sí mostró una tendencia positiva en el alargamiento a la rotura, sugiriendo que el ácido cítrico actúa simultáneamente como compatibilizante y plastificante interfacial, incrementando la deformabilidad del material antes de la fractura [5].

Respecto a la humectabilidad, el PLA reciclado presentó un ángulo de contacto de 58,54°, reflejando un carácter moderadamente hidrofílico. Las mezclas no mostraron una tendencia lineal en función del contenido de TPS, lo que indica que las propiedades superficiales están determinadas por la composición local de la superficie más que por la composición global del material (Figura 6). Esta variabilidad es consistente con la reportada en la literatura para sistemas PLA/TPS y se relaciona con el tipo de plastificante, el origen del almidón y los parámetros de procesado empleados [6].

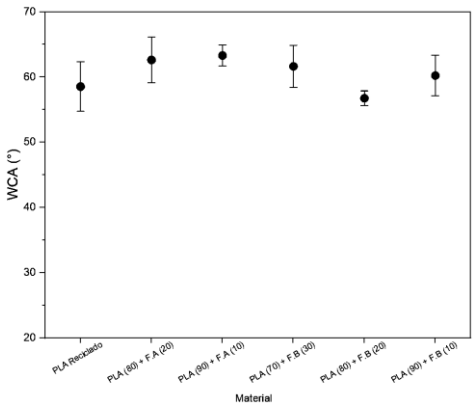



**Figura 6.** Ángulo de contacto con el agua (WCA) de películas delgadas de PLA y PLA-TPS.

### Potencial de los films como matrices para quantum dots

Los films de rPLA/TPS desarrollados son candidatos de interés como matrices para la incorporación de quantum dots (QDs). La semitransparencia de las formulaciones con 10–20% de TPS favorece la transmisión óptica requerida en aplicaciones de sensado fluorescente o embalaje activo. Además, la superficie parcialmente hidrofílica (ángulos de contacto entre 55° y 65°) podría facilitar la compatibilización con QDs

funcionalizados, reduciendo la agregación y preservando sus propiedades ópticas. En conjunto, la biodegradabilidad, la base renovable y la posibilidad de ajustar la transparencia mediante la composición abren una vía hacia dispositivos ópticos flexibles de bajo impacto ambiental.

## CONCLUSIONES

Los residuos de PLA de impresión 3D constituyen una materia prima viable para su revalorización por extrusión, con impurezas inferiores al 2% que no comprometen el procesado. El perfil de temperatura 160-180-177-169 ºC se estableció como condición óptima para la obtención de films continuos y homogéneos. La incorporación de ácido cítrico en el TPS (F.B) mejoró la compatibilidad interfacial y la procesabilidad de las mezclas, siendo las composiciones PLA/TPS 90/10 y 80/20 con F.B las más adecuadas. Finalmente, las características ópticas y superficiales de estos films biodegradables abren perspectivas para su uso como matrices para quantum dots en aplicaciones fotónicas sostenibles.

## AGRADECIMIENTOS

Cristina Pavón agradece la ayuda postdoctoral PAID-10-23 de la Universitat Politècnica. H. de la Rosa-Ramírez agradece la ayuda postdoctoral PAID-10-24 de la Universitat Politècnica de València. Este trabajo se enmarca en el proyecto PID2023-152869OB-C22, financiado por MCIN/AEI y la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

## REFERENCIAS

[1] Lee, Dongoh; *et al.* (2022).“Thermal and Mechanical Degradation of Recycled Polylactic Acid Filaments for Three-Dimensional Printing Applications”. *Polymers (Basel).* v. 14, n. 24, p.p. 5385. https://doi.org/10.3390/polym14245385

[2] Piasek, Anna; *et al.* (2025).“Application of carbon quantum dots in smart polymer films for biomedical diagnostics”. *Nanoscale*. v. 17, n. 42, p.p. 24427–24456. https://doi.org/10.1039/D5NR02878G.

[3] Arfiathi, Arfiathi; *et al.* (2024).“Effect of citric acid on the properties of thermoplastic bitter cassava starch plasticized with isosorbide”. *Polym. from Renew. Resour.* v. 15, n. 1, p.p. 43–59. https://doi.org/10.1177/20412479231202591.

[4] Fonseca-García, Abril; *et al.* (2022).“Miscibility study of thermoplastic starch/polylactic acid blends: Thermal and superficial properties”. *Carbohydrate Polymers,* v. 293, p.p. 119744. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119744.

[5] Palai, Bishwabhusana; *et al.* (2019).“In situ reactive compatibilization of polylactic acid (PLA) and thermoplastic starch (TPS) blends; synthesis and evaluation of extrusion blown films thereof”. *Industrial Crops and Products,* v. 141, p.p. 111748. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111748.

[6] Chantre López ,Adriana Rocío; *et al.*; (2023).“Propiedades mecánicas de películas obtenidas a partir de pellets de almidón termoplástico almacenados en diferentes condiciones”. *Acta Agronómica*. v. 72, n. 3, p.p. 225–233. https://doi.org/10.15446/ACAG.V72N3.108129.

# Investigación de Sinergias en Mezclas de SLS+LDAO para Reducir la Irritación Dérmica y Aumentar la Eficacia

**Elena Herrero[1, 2], Cristina Calabuig[1], Bonet-Aracil Marilés[2], Francisco Ríos[3], Manuela Lechuga[3]**

*(1) E.T. Cosmética y Detergencia. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España.*

*(2) Departamento de Ingeniería Textil y Papelera – Universitat Politècnica de València, Campus de Alcoi, Alcoi, Alacant.*

*(3) Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, España*

## RESUMEN

Los tensioactivos son componentes clave en formulaciones de limpieza y cosmética por su capacidad para reducir la tensión superficial y generar emulsiones y espuma. Sin embargo, tensioactivos aniónicos ampliamente utilizados, como el lauril sulfato sódico (SLS), presentan un elevado potencial irritante, lo que limita su uso en formulaciones suaves.

La combinación de tensioactivos de distinta naturaleza se ha demostrado eficaz para mejorar el rendimiento funcional mediante efectos sinérgicos, reduciendo la agresividad del sistema. En este contexto, la mezcla de SLS con tensioactivos anfóteros como el óxido de laurildimetilamina (LDAO) resulta especialmente atractiva por su buena compatibilidad, menor irritabilidad y elevado poder espumante [1].

En este trabajo se analizan mezclas binarias SLS/LDAO en distintas proporciones (90:10–50:50), evaluando su posible sinergia en parámetros clave para formulaciones de limpieza: concentración micelar crítica, tensión superficial, volumen y estabilidad de la espuma, y potencial irritante mediante el ensayo de Zeina.

**Palabras clave:** Irritación dérmica, surfactantes, interacción sinérgica, test de la zeína, generación de espuma, tensión superficial

## INTRODUCCIÓN

Las mezclas de tensioactivos se utilizan ampliamente en formulaciones cosméticas y detergentes para optimizar el equilibrio entre rendimiento y suavidad mediante interacciones sinérgicas. En este estudio se analizó de forma sistemática el comportamiento fisicoquímico de mezclas binarias del tensioactivo aniónico lauril sulfato de sodio (SLS) y el tensioactivo anfótero óxido de lauril dimetilamina (LDAO) en proporciones comprendidas entre 90:10 y 50:50, con el objetivo de correlacionar el comportamiento macroscópico con las interacciones moleculares en micelas mixtas y en la interfaz aire–agua.

Se llevaron a cabo medidas de tensión superficial, determinación de la concentración micelar crítica (CMC), evaluación de la generación de espuma y análisis del potencial irritante mediante el ensayo de Zeina, tanto para los tensioactivos individuales como para sus mezclas. Asimismo, se calcularon parámetros de interacción asociados a la micelización mixta y a la adsorción interfacial empleando modelos termodinámicos establecidos. Todas las mezclas SLS:LDAO mostraron una reducción significativa de la CMC y de la tensión superficial mínima respecto a los tensioactivos individuales, con

valores experimentales inferiores a los predichos por modelos ideales y parámetros de interacción negativos ($\beta^M$ y $\beta^\sigma$), indicativos de interacciones atractivas en los sistemas mixtos [1].

La capacidad espumante se incrementó en todas las mezclas binarias, superando el comportamiento de los componentes individuales, mientras que el aumento del contenido de LDAO condujo a una disminución marcada de la desnaturalización proteica. Los valores de Zeina de las mezclas fueron significativamente inferiores a los del SLS puro y a los valores acumulativos teóricos, evidenciando una reducción sinérgica del potencial irritante. En conjunto, los resultados confirman la formación de micelas mixtas y capas interfaciales termodinámicamente estables, proporcionando una base sólida para el diseño racional de formulaciones más suaves y eficientes.

## OBJETIVOS

Este estudio tiene como objetivo investigar el comportamiento fisicoquímico y las interacciones sinérgicas de mezclas binarias SLS: LDAO a diferentes composiciones, correlacionando el rendimiento macroscópico con las interacciones a nivel molecular en micelas mixtas y en la interfaz aire–agua. Asimismo, se pretende cuantificar las desviaciones del comportamiento ideal mediante parámetros termodinámicos y evaluar su impacto en la actividad superficial, la generación de espuma y el potencial irritante, con el fin de contribuir al diseño de sistemas tensioactivos más eficientes y suaves.

## RESULTADOS

### Tensión superficial y CMC

La tensión superficial de las diferentes mezclas se ha evaluado con un tensiómetro óptico y aplicando la metodología “pendant drop”. Mediante la representación en una gráfica de barridos de concentración frente a la tensión superficial en soluciones de las mezclas de cada tensioactivo y de los ingredientes puros se determinó la Concentración Micelar Crítica (CMC) y la tensión superficial mínima de cada uno de ellos [2, 4] (Tabla 1).

**Tabla 1.** CMC, $\gamma_{mínimo}$ y $C_{12}$ de las mezclas SLS+LDAO y los tensioactivos puros

| Disolución | CMC (mg/L) | $\gamma_{mínima}$ (mN/m) | $C_{12}$ (mg/L) $^*_{31mN/M}$ |
|---|---|---|---|
| 50:50 | 263 | 23,7 | 56,3 |
| 60:40 | 219 | 24,1 | 109,1 |
| 70:30 | 202 | 24,3 | 180,8 |
| 80:20 | 212 | 24,5 | 206,4 |
| 90:10 | 208 | 24,7 | 217,6 |

Los resultados muestran que el SLS tiene una CMC mucho más alta que el LDAO y que sus mezclas, como cabe esperar siendo un tensioactivo aniónico.

Así mismo, se ha cuantificado la sinergia de las mezclas SLS+LDAO mediante la obtención de los parámetros de interacción superficiales para la generación de micelas ($\beta^M$) y para la adsorción en la interfase ($\beta^\sigma$) aplicando las siguientes ecuaciones [1]:

$$\frac{(X_1^M)^2 ln(\alpha C_{12}^M / X_1^M C_1^M)}{(1-X_1^M)^2 ln[(1-\alpha)C_{12}^M/(1-X_1^M)C_2^M]} = 1;\ \beta^M = \frac{ln(\alpha C_{12}^M / X_1^M C_1^M)}{(1-X_1^M)^2}$$

$$\frac{X_1^2 ln(\alpha C_{12}/X_1 C_1^0)}{(1-X_1)^2 ln[(1-\alpha)C_{12}/(1-X_1)C_2^0]} = 1;\ \beta^\sigma = \frac{ln(\alpha C_{12}/X_1 C_1^0)}{(1-X_1)^2}$$

Las Tablas 2 y 3 muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de las ecuaciones previas:

**Tabla 2.** Obtención de los parámetros de interacción para la generación de micelas

| **Interacción en la generación de micelas $X^M1$ y $b^M$ mezclas SLS:LDAO** | | |
|---|---|---|
| SLS:LDAO | $X^M1$ (mol) | $b^M$ mol |
| 90:10 | 0,594 | -5,955 |
| 80:20 | 0,550 | -4,925 |
| 70:30 | 0,511 | -4,646 |
| 60:40 | 0,476 | -4,042 |
| 50:50 | 0,432 | -3,15 |

**Tabla 3.** Obtención de los parámetros de interacción para la adsorción en la interfase

| **Interacción en la adsorción en la interfase $X_1$ y $b^s$ mezclas SLS:LDAO** | | |
|---|---|---|
| SLS:LDAO | $X_1$ interfase | $b^s$ |
| 90:10 | 0,509 | -4,582 |
| 80:20 | 0,430 | -3,414 |
| 70:30 | 0,378 | -3,226 |
| 60:40 | 0,368 | -4,712 |
| 50:50 | 0,391 | -7,535 |

Los parámetros negativos de $\beta^m$ y $\beta^\sigma$ indican la existencia de interacción sinérgica en el sistema SLS+LDAO tanto para la generación de micelas como para la adsorción en la interfase, siendo mayor la interacción cuánto mayor es el valor absoluto de $\beta$.

**Desnaturalización de proteínas: (test de zeína + N Kjeldahl)**

El test de la zeína es un método ampliamente utilizado que permite estimar el potencial irritante de tensioactivos a partir de la cantidad solubilizada de esta proteína, la cual tiene un comportamiento similar a los queratinocitos de la piel [6].

La cantidad de zeína disuelta se analiza cuantificando el nitrógeno en disolución mediante el método Kjeldahl. Cuanto mayor sea el valor de zeína, más proteína se ha desnaturalizado y, por tanto, más irritante es la disolución testada. El método oficial incluye la clasificación del potencial irritante del tensioactivo en función del valor de zeína obtenido, el cual se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Clasificación del potencial irritante dependiendo del valor de zeína

| **Clasificación potencial irritante** | |
|---|---|
| mgN/100mL | **Descripción** |
| 500 | Irritante II |

| | |
|---|---|
| 400 | Irritante I |
| 200-400 | Moderadamente irritante |
| 0-200 | No irritante |

Mediante el método de la zeína se ha cuantificado el poder irritante de las mezclas binarias de SLS: LDAO y, por otro lado, se ha evaluado si existe un efecto sinérgico en la capacidad irritante, analizando los tensioactivos individualmente en la concentración en la que se encuentran en estas mezclas binarias y sumando posteriormente los valores obtenidos para obtener el valor de zeína acumulado. Posteriormente, se ha cuantificado el efecto sinérgico comparando el valor de zeína de la mezcla frente al valor de zeína acumulado y expresa como % de aumento. Este estudio permite conocer la proporción entre SLS y LDAO que proporciona la sinergia máxima.

La Figura 2 muestra los valores de zeína (mgN/100 mL). A mayor proporción de LDAO, menor es el potencial irritante: SLS es irritante tipo I, las mezclas 90:10–70:30 son moderadamente irritantes, y 60:40–50:50 no irritantes.

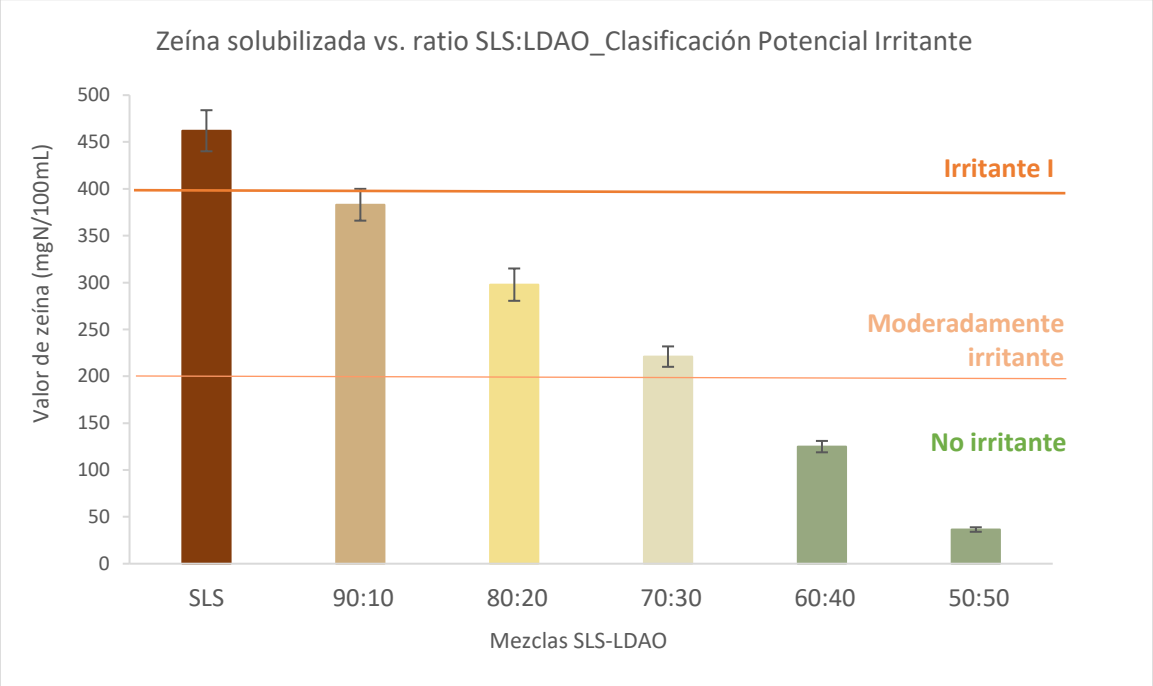



**Figura 1.** Valor de zeína en cada una de las mezclas.

Este estudio demuestra que las micelas mixtas SLS–LDAO reducen significativamente la irritación del SLS, logrando mezclas moderadamente irritantes o no irritantes [3].

Para evaluar el posible efecto sinérgico que ocurre en las mezclas de tensioactivos, en la tabla 5 se presenta la zeína disuelta por cada tensioactivo individual en la concentración en la que se encuentra en las mezclas (Zn Individual), la suma de la contribución de cada ingrediente (Zn Acumulada) y la comparativa con el valor de zeína de la mezcla obtenido experimentalmente (Zeína Mezcla) [5]. Asimismo, se ha calculado el porcentaje de aumento del potencial irritante al considerar el efecto acumulativo (Tabla 5).

La desnaturalización de la zeína por las mezclas de tensioactivos fue menor que la suma de los efectos individuales, lo que indica un efecto sinérgico entre SLS y LDAO que reduce el potencial irritante [5]. Este efecto fue más notable en las mezclas con mayor proporción de LDAO.

**Tabla 5.** Cálculo del valor de zeína en las mezclas por separado.

| Disoluciones tensioactivos puros | N total (mgN/100mL) | Zeína acumulada (mgN/100mL) | Zeina experimental (mgN/100mL) | % aumento |
|---|---|---|---|---|
| SLS 90 | 412 | 421,13 | 383,0 | 9,95 |
| LDAO 10 | 15 | | | |
| SLS 80 | 341,6 | 346,36 | 297,8 | 16,32 |
| LDAO 20 | 16,5 | | | |
| SLS 70 | 285,3 | 287,59 | 221,0 | 30,14 |
| LDAO 30 | 19,9 | | | |
| SLS 60 | 259,8 | 262,12 | 124,9 | 109,83 |
| LDAO 40 | 25,8 | | | |
| SLS 50 | 208 | 209,55 | 36,5 | 474,90 |
| LDAO 50 | 30,9 | | | |

## Generación de espuma

La generación y estabilidad de la espuma obtenida se ha evaluado mediante el SITA Foam Tester R-2000. Se han utilizado disoluciones con diferentes proporciones SLS: LDAO al 0,1% de materia activa.

En la Figura 4 se muestra la evolución del volumen de espuma generado tras 3 ciclos de agitación aplicados para cada una de las mezclas SLS: LDAO evaluadas, así como para los tensioactivos individuales.

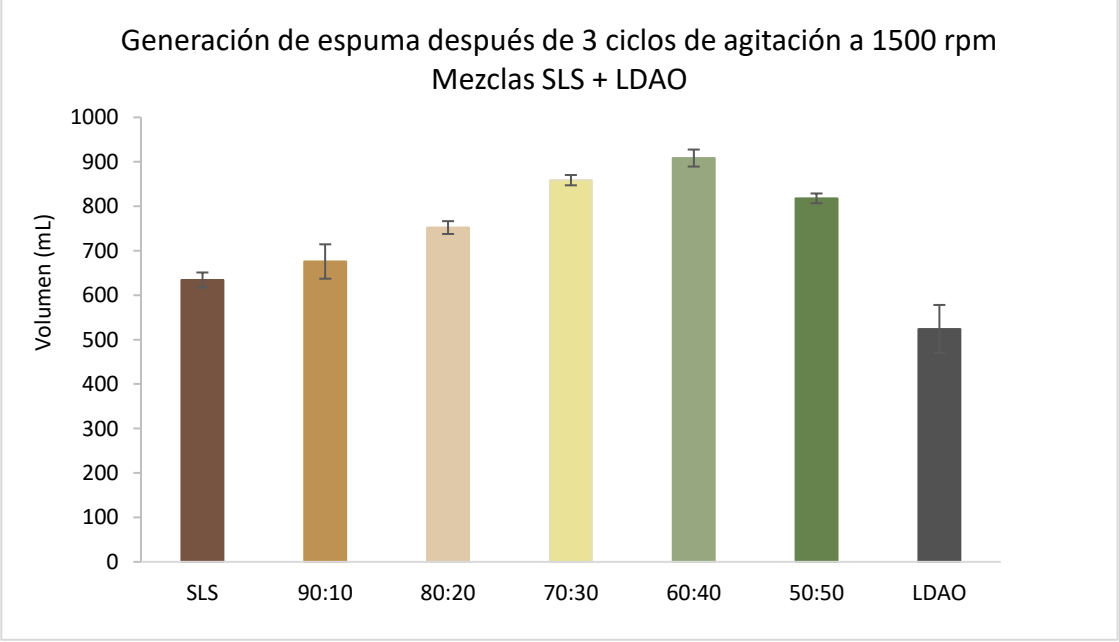



**Figura 2.** Generación de espuma (mL) vs. SLS:LDAO en los diferentes ciclos de agitación.

Se puede apreciar que la generación de espuma es mayor cuanto mayor es el contenido en LDAO alcanzando un máximo para la proporción SLS: LDAO de 60:40. Por tanto, a

pesar de que el LDAO tiene peor comportamiento en la generación de espuma, sirve como co-tensioactivo para mejorar las propiedades espumantes del SLS [8, 9].

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que las mezclas binarias de SLS y LDAO presentan un comportamiento claramente no ideal, caracterizado por fuertes interacciones atractivas que favorecen la formación de micelas mixtas. Esta sinergia se traduce en una mejora significativa de la eficiencia de micelización, evidenciada por la reducción de la concentración micelar crítica y de la tensión superficial respecto a los tensioactivos individuales.

Desde el punto de vista funcional, las mezclas muestran un incremento notable en la capacidad de generación de espuma, confirmando un comportamiento superior al de los componentes puros. Paralelamente, el aumento del contenido de LDAO contribuye de forma significativa a la reducción de la desnaturalización proteica, reflejando una disminución del potencial irritante. Cabe destacar que los valores de irritación obtenidos son inferiores a los esperados por aditividad, lo que confirma un efecto sinérgico positivo.

En conjunto, este estudio pone de manifiesto que la combinación SLS: LDAO constituye una estrategia eficaz para el desarrollo de formulaciones tensioactivas optimizadas, capaces de maximizar el rendimiento mientras se minimiza el impacto sobre la piel, ofreciendo una base sólida para el diseño racional de productos más eficientes y respetuosos.

## REFERENCIAS

[1] Rosen, M. J., Kunjappu, J. T. (2012). “Surfactants and interfacial phenomena”. *John Wiley & Sons*. Publicado en: New Jersey, EE.UU. ISBN: 978-0-470-54194-4

[2] Berry, J. D., Neeson, M. J., Dagastine, R. R., Chan, D. Y. C., Tabor, R. F. (2015). “Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry”. *Journal of Colloid and Interface Science. v. 454*, p.p. 226–237. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.05.012

[3] Joshi, T., Mata, J., Bahadur, P. (2005). “Micellization and interaction of anionic and nonionic mixed surfactant systems in water”. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 260*, p.p. 209–215. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.03.009

[4] Salager, J. L., Antón, R. (2005). “Métodos de medición de la tensión superficial o interfacial (FIRP S205-B)”. Universidad de los Andes.

[5] Paye, M., Block, C., Hamaide, N., Hüttmann, G.-e., Kirkwood, S., Lally, C., Lloyd, P. H., Makela, P., Razenberg, H., Young, R. (2006). “Antagonisms between surfactants: The case of laundry detergents”. *Tenside Surfactants Detergents*. v. 43, n. 6, p.p. 290–294. https://doi.org/10.3139/113.100316

[6] European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *The zein test: Skin irritation and corrosivity* (DB-ALM Protocol No. 26).

[7] Myers, D. (2005). “Surfactant science and technology”. *John Wiley & Sons*. Publicado en: EE. UU. ISBN: 9781119465843

[8] Martín, J. F. G., Herrera-Márquez, O., Vicaria, J. M., Jurado, E. (2014). “Synergistic effect on wettability of mixtures of amine oxides, alkylpolyglucosides, and ethoxylated fatty alcohols”. *Journal of Surfactants and Detergents.* v. *17, n.* 5, p.p. 1035–1042.

# SUBBIMATT: Materiales sostenibles, de base biológica y bioinspirados para textiles técnicos inteligentes

**Marco, Bruno[(1)], Calvo, Óscar [2)], Pascual, Carlos[(1)], Alemany, Álvaro[(2)], Herraez, Víctor[(1)], Yagüe, Jesús[(1)]**

*(1) Grupo de I+D de Salud y Sanidad Ambiental, AITEX, Carretera de Banyeres, 10, 03802 Alcoy, Alicante)*

*(2) Grupo de I+D de Ecoprocesos y Hábitat, AITEX, Carretera de Banyeres, 10, 03802 Alcoy, Alicante)*

## RESUMEN

El sector textil europeo enfrenta desafíos estructurales asociados a su elevado impacto ambiental, su dependencia de materias primas fósiles y la limitada implementación de estrategias de circularidad. En este contexto, el proyecto europeo SUBBIMATT (Sustainable, Biobased and Bio-Inspired Materials for Smart Technical Textiles) tiene como objetivo el desarrollo de una nueva generación de materiales textiles inteligentes sostenibles basados en polímeros biobasados y principios bioinspirados. El proyecto integra un enfoque Safe and Sustainable by Design (SSbD), que permite evaluar de manera temprana los impactos ambientales, de seguridad y socioeconómicos, facilitando el diseño de soluciones más responsables. A partir del desarrollo de materiales avanzados, como poliuretanos funcionales, hidrogeles termo-responsivos y sistemas adhesivos desmontables, se generan intermedios textiles y materiales inteligentes con funcionalidades avanzadas como la actuación mecánica, la recolección de energía y la regulación adaptativa de la permeabilidad. Los resultados preliminares confirman la viabilidad técnica de los materiales desarrollados, aunque se identifican retos en procesabilidad e integración.

**Palabras clave:** textiles inteligentes, biopolímeros, sostenibilidad, SSbD, economía circular, materiales funcionales, smart textiles.

## INTRODUCCIÓN

El sector textil representa uno de los sistemas industriales con mayor impacto ambiental a nivel global, debido a su elevada demanda de recursos naturales, su dependencia de materias primas de origen fósil y la generación masiva de residuos. En Europa, la producción anual de residuos textiles alcanza niveles significativos y la proporción de reciclado efectivo continúa siendo limitada, lo que evidencia la necesidad de una transformación estructural del modelo productivo.

En respuesta a estos desafíos, la Unión Europea ha impulsado un conjunto de políticas orientadas hacia la transición circular y climáticamente neutra, destacando la Estrategia Europea de Textiles Sostenibles [1]. Estas iniciativas promueven una integración temprana de la sostenibilidad en el diseño de productos, así como el desarrollo de materiales innovadores que reduzcan el impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida.

Dentro de este marco se desarrolla el proyecto SUBBIMATT, financiado bajo el programa Horizon Europe [2], cuyo objetivo es redefinir el desarrollo de materiales textiles técnicos mediante la combinación de sostenibilidad, funcionalidad avanzada y

circularidad. El enfoque del proyecto se basa en la integración de tres pilares fundamentales: el desarrollo de materiales biobasados, la generación de estructuras textiles funcionales y la implementación de materiales textiles inteligentes (Smart Textile Materials, STM).

Uno de los aspectos más relevantes del proyecto es la adopción de la metodología *Safe and Sustainable by Design* (SSbD) [3], que permite evaluar simultáneamente aspectos de seguridad, impacto ambiental y viabilidad socioeconómica desde las primeras fases del desarrollo. Este enfoque supone un cambio significativo respecto a modelos tradicionales, donde la evaluación se realiza en etapas posteriores, limitando la capacidad de optimización.

A diferencia de enfoques existentes, SUBBIMATT propone la integración simultánea de materiales biobasados avanzados con funcionalidades inteligentes y evaluación SSbD desde fases tempranas, lo que permite optimizar de manera conjunta rendimiento técnico, sostenibilidad y seguridad, superando el enfoque tradicional secuencial.

## OBJETIVOS

El proyecto SUBBIMATT tiene como objetivo general el desarrollo de una nueva generación de materiales textiles inteligentes sostenibles que contribuyan a la transición hacia un modelo industrial más circular y eficiente.

Este objetivo se aborda a través de varias líneas de trabajo interrelacionadas. En primer lugar, se plantea el desarrollo de nuevos materiales biobasados con propiedades funcionales avanzadas, incluyendo poliuretanos con capacidad de memoria de forma [4] y autorreparación [5], así como sistemas adhesivos desmontables diseñados para facilitar la separación de componentes al final de vida. Asimismo, se investigan materiales termo-responsivos capaces de modificar su comportamiento en función de estímulos externos, particularmente la temperatura.

A partir de estos materiales, el proyecto persigue la generación de intermedios textiles funcionales mediante tecnologías convencionales adaptadas, como el recubrimiento, la extrusión y el electrospinning [6]. Estos intermedios constituyen la base para la fabricación de materiales textiles inteligentes capaces de proporcionar nuevas funcionalidades.

Finalmente, el proyecto contempla la integración de estas tecnologías en aplicaciones reales mediante tres demostradores: envolventes arquitectónicas adaptativas, generadores textiles (piezo y triboeléctricos) para interior de automoción, y prendas técnicas con propiedades dinámicas de confort.

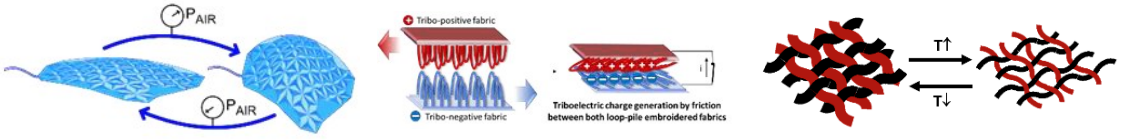



**Figura 1.** Demostradores de materiales textiles funcionales: (izq.) STM1 - envolvente arquitectónica adaptativa; (centro) STM2 – generadores textiles piezo y triboeléctricos; (dcha.), STM3 – tejido dinámico para confort.

De manera transversal, todos los desarrollos se evalúan bajo el marco SSbD, incorporando herramientas de evaluación ambiental, económica y social.

## RESULTADOS

### Desarrollo de materiales biobasados funcionales

Durante los primeros 18 meses del proyecto se ha alcanzado un avance significativo en el desarrollo de materiales biobasados con funcionalidades específicas. En particular, se han desarrollado diferentes formulaciones de poliuretanos biobasados con propiedades de autorreparación, basadas en interacciones dinámicas reversibles. Los resultados obtenidos indican eficiencias de autorreparación superiores al 80% en condiciones controladas, lo que representa un avance relevante en la durabilidad de recubrimientos textiles.

En paralelo, se han desarrollado poliuretanos con memoria de forma (SMPU) capaces de recuperar su estado original tras la aplicación de estímulos térmicos. Estos materiales han mostrado ratios de recuperación superiores al 95%, con temperaturas de transición ajustadas al rango de interés para aplicaciones textiles.

Asimismo, se han sintetizado hidrogeles termo-responsivos (NTR) capaces de modificar su volumen en función de la temperatura, con temperaturas de transición cercanas a 30–32 °C. Este comportamiento resulta especialmente relevante para el desarrollo de textiles adaptativos capaces de regular su permeabilidad al vapor.

A pesar de estos avances, se ha identificado cierta variabilidad en el comportamiento de las formulaciones, lo que pone de manifiesto la necesidad de optimizar parámetros de síntesis y composición para mejorar la reproducibilidad y estabilidad.

### Procesado y desarrollo de intermedios textiles

En cuanto al desarrollo de intermedios textiles, se han realizado avances en la aplicación de tecnologías de procesado como melt-spinning y electrospinning. En el caso de la extrusión de filamentos, se han identificado limitaciones significativas en la procesabilidad de los poliuretanos con memoria de forma, principalmente asociadas a problemas de adhesividad y estabilidad térmica durante el procesado. Estos resultados han llevado a la evaluación de estrategias de compatibilización mediante mezclas con poliuretanos termoplásticos comerciales.

Por otro lado, se han producido nanomembranas mediante electrospinning utilizando polímeros como fluoruro de polivinilideno (PVDF) con incorporación de nanotubos de carbono (CNT), para la evaluación comparativa de las nanomembranas de biopolímeros que se desarrollarán en el futuro. La Figura 2 muestra la morfología de las nanofibras, observándose una distribución homogénea de CNTs y la formación de estructuras y fibras homogéneas.

En el ámbito de los recubrimientos textiles, se han desarrollado sistemas basados en dispersiones acuosas de poliuretano con capacidad de autorreparación, aplicados mediante técnicas convencionales como knife-coating. Estos sistemas han demostrado buen comportamiento en términos de deposición y formación de películas, aunque se ha identificado la necesidad de mejorar su estabilidad a largo plazo.

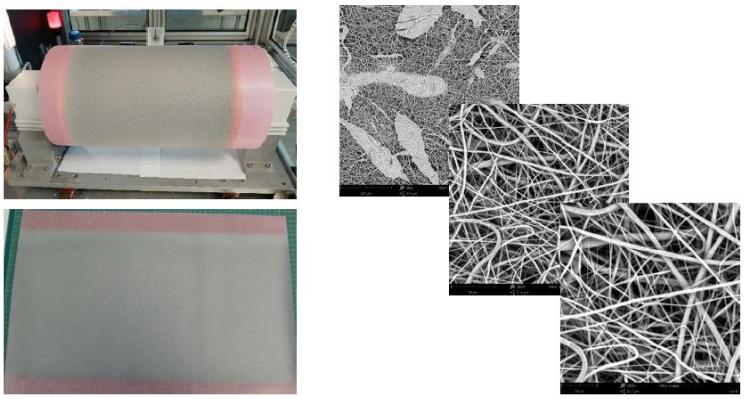


**Figura 2.** Caracterización morfológica de membranas de nanofibras con nanotubos de carbono (CNTs). Izq. escala macroscópica; Dcha. escala microscópica.

## Definición y desarrollo de materiales textiles inteligentes

Uno de los hitos alcanzados en esta fase del proyecto ha sido la definición de las arquitecturas y especificaciones de los materiales textiles inteligentes (STM). Se han establecido tres líneas principales de desarrollo.

En primer lugar, los actuadores textiles inflables, basados en estructuras recubiertas capaces de deformarse mediante la aplicación de presión, han sido definidos en términos de requisitos mecánicos y de estanqueidad. Estos sistemas requieren materiales con alta resistencia mecánica y capacidad de sellado, así como compatibilidad con procesos de soldadura.

En segundo lugar, se han diseñado sistemas textiles para la recolección de energía basados en efectos piezoeléctrico y triboeléctrico. En este caso, se han desarrollado tanto estructuras textiles convencionales como sistemas basados en nanomembranas, orientados a maximizar la generación energética.



**Figura 3.** Estructura multicapa textil compuesta por un núcleo de membrana de nanofibras piezoeléctricas.

Finalmente, se han conceptualizado tejidos con apertura regulable basados en la combinación de materiales con memoria de forma e hidrogeles termo-responsivos, capaces de modificar su estructura en función de la temperatura.

### Implementación del enfoque Safe and Sustainable by Design (SSbD)

De manera transversal, se ha implementado el enfoque SSbD como herramienta central del proyecto. En esta fase inicial, se ha realizado una evaluación preliminar basada en el análisis de peligrosidad de las sustancias, utilizando información proveniente de bases de datos regulatorias (REACH, CLP).

Asimismo, se han desarrollado modelos predictivos basados en QSAR, incluyendo la generación de nuevos modelos para *endpoints* específicos como la mutagenicidad germinal. Estos modelos permiten cubrir lagunas de datos y mejorar la evaluación de riesgos en etapas tempranas.

En paralelo, se ha llevado a cabo la primera evaluación de ciclo de vida (LCA) de formulaciones de poliuretanos, utilizando la metodología EF3.1. Los resultados indican que, si bien el uso de materias primas biobasadas puede reducir el impacto ambiental, las diferencias respecto a alternativas fósiles son moderadas en algunos indicadores, debido al impacto asociado a procesos agrícolas.

Este enfoque permite una toma de decisiones basada en datos desde fases tempranas, reduciendo riesgos regulatorios y mejorando la alineación con la normativa europea

### Identificación de retos y limitaciones

Los resultados obtenidos hasta el momento ponen de manifiesto una serie de retos técnicos relevantes. Entre ellos destacan los problemas de procesabilidad de algunos polímeros biobasados, especialmente en procesos de extrusión, así como la estabilidad limitada de determinadas formulaciones acuosas.

Asimismo, la integración de distintas funcionalidades en un único sistema, como en el caso de los materiales textiles inteligentes, plantea desafíos en términos de compatibilidad de materiales y diseño estructural.

Por otro lado, se ha identificado la necesidad de mejorar la disponibilidad de datos para la evaluación de sostenibilidad, especialmente en relación con materiales innovadores no incluidos en bases de datos estándar.

## CONCLUSIONES

El proyecto SUBBIMATT demuestra el potencial de los materiales biobasados y las soluciones bioinspiradas para transformar el sector textil hacia un modelo más sostenible y funcional. Los resultados alcanzados en los primeros meses evidencian la viabilidad de desarrollar materiales con propiedades avanzadas, como autorreparación, memoria de forma o respuesta térmica.

No obstante, el proyecto también ha permitido identificar limitaciones importantes, especialmente en la etapa de transición desde el laboratorio hacia procesos industriales. La optimización de la procesabilidad, la estabilidad de las formulaciones y la integración

de funcionalidades múltiples constituyen los principales desafíos a abordar en las siguientes fases.

El enfoque *Safe and Sustainable by Design* se consolida como una herramienta clave para guiar el desarrollo de materiales, permitiendo integrar criterios de sostenibilidad desde fases tempranas y facilitando la toma de decisiones.

En conjunto, SUBBIMATT contribuye a sentar las bases para una nueva generación de textiles inteligentes sostenibles, alineados con los objetivos de economía circular y neutralidad climática, y refuerza el papel de la innovación en el posicionamiento competitivo del sector textil europeo [7].

## AGRADECIMIENTOS

Financiado por la Unión Europea bajo el GA número 101129911- Proyecto SUBBIMATT.

Co-funded by
the European Union

## REFERENCIAS

[1] European Environment Agency (2022). "Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy". *European Environment Agency*, v. 2022, n. 01, p.p. 1-40. https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the

[2] European Commission. "Project 101129911 – SUBBIMATT". https://cordis.europa.eu/project/id/101129911

[3] Caldeira, C., Farcal, R., Garmendia Aguirre, I., Mancini, L., Tosches, D., Amelio, A., Rasmussen, K., Rauscher, H., Riego Sintes, J. and Sala, S., Safe and sustainable by design chemicals and materials - Framework for the definition of criteria and evaluation procedure for chemicals and materials, EUR 31100 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-53264-4, doi:10.2760/487955, JRC128591.

[4] Behl, Marc.; *et al.* (2007). "Shape-memory polymers". *Materials Today*, v. 10, n. 4, p.p. 20–28. http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70047-0

[5] Hager, Martin. D.; *et al.* (2010). "Self-healing materials". *Advanced Materials*, v. 22, n. 47, p.p. 5424–5430. http://dx.doi.org/10.1002/adma.201003036

[6] Li, D.; *et al.* (2004). "Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel?". *Advanced Materials*, v. 16, n. 14, p.p. 1151–1170. http://dx.doi.org/10.1002/adma.200400719

[7] SUBBIMATT Project Consortium. "Sustainable, Biobased and Bio-Inspired Materials for Smart Technical Textiles (SUBBIMATT)". *https://subbimatt.eu/*

# Enfoque cuantitativo integrado para la implementación del marco Safe and Sustainable by Design (SSbD) en nanomateriales: metodología y aplicación en el proyecto INTEGRANO.

**Marco, Bruno[(1)], Pascual, Carlos[(1)], Romero, Alicia[(1)], Pérez, Emma[(1)], Blanes, Maria[(2)], Molina, Cristina[(3)]**

*(1) Grupo de I+D en Salud y Sanidad Ambiental, AITEX, Carretera de Banyeres, 10. 03802 Alcoy, Alicante. bmarco@aitex.es*

*(2) Coordinación I+D, AITEX, Carretera de Banyeres, 10. 03802 Alcoy, Alicante.*

*(3) Proyectos Internacionales, AITEX, Carretera de Banyeres, 10. 03802 Alcoy, Alicante.*

## RESUMEN

El desarrollo de nanomateriales y productos *nano-enabled* introduce desafíos relevantes relacionados con su seguridad, sostenibilidad y aceptación regulatoria. En este contexto, el enfoque *Safe and Sustainable by Design* (SSbD) emerge como un marco estratégico que permite integrar estos aspectos desde etapas tempranas del desarrollo.

El proyecto europeo INTEGRANO propone una metodología cuantitativa multidimensional orientada a evaluar la seguridad y sostenibilidad de nanomateriales a lo largo de todo su ciclo de vida. Para ello, combina datos experimentales, modelos predictivos y herramientas digitales de apoyo a la decisión.

En este trabajo se presenta una introducción al concepto SSbD y se describe la metodología desarrollada en el proyecto INTEGRANO, con especial énfasis en su capacidad para integrar distintas dimensiones de evaluación y facilitar la toma de decisiones. Asimismo, se aborda de manera global la aplicación de este enfoque a seis casos de estudio industriales representativos de diferentes cadenas de valor.

**Palabras clave:** SSbD, nanomateriales, sostenibilidad, ciclo de vida, evaluación integrada.

## INTRODUCCIÓN

Durante la última década, los nanomateriales han adquirido un papel central en el desarrollo de soluciones avanzadas en múltiples sectores industriales, gracias a sus propiedades únicas derivadas de su tamaño y estructura. Sin embargo, la misma complejidad que confiere estas propiedades también introduce incertidumbres asociadas a su comportamiento en entornos reales, especialmente en lo que respecta a su posible toxicidad, su persistencia en el medio ambiente y las rutas de exposición humana.

El enfoque tradicional de evaluación, basado en fases finales del desarrollo, ha demostrado ser limitado, ya que dificulta la introducción de modificaciones sustanciales en el diseño del material una vez que este está suficientemente avanzado. Como respuesta a esta problemática, la Comisión Europea ha promovido el enfoque *Safe and Sustainable by Design* (SSbD), que plantea la integración sistemática de criterios de

seguridad y sostenibilidad en las primeras etapas del diseño de materiales y productos [1].

Este enfoque se fundamenta en la evaluación simultánea de diferentes dimensiones que incluyen la seguridad, el impacto ambiental, la viabilidad económica, la aceptación social y la funcionalidad técnica. La incorporación de estas dimensiones permite abordar el desarrollo de materiales de manera más holística y alineada con los requerimientos regulatorios actuales y futuros [1,2].

En este contexto se desarrolla el proyecto europeo INTEGRANO, cuyo objetivo es proporcionar un marco metodológico cuantitativo capaz de integrar estas dimensiones mediante herramientas avanzadas de modelización y evaluación, facilitando la identificación de soluciones óptimas en escenarios reales de ciclo de vida.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es presentar de forma estructurada el marco SSbD y su implementación dentro del proyecto INTEGRANO. En este sentido, se pretende describir la metodología desarrollada, explicar su enfoque integrado y poner en valor su aplicabilidad a distintos sectores industriales a través de los casos de estudio definidos en el proyecto.

## RESULTADOS

### Marco *Safe and Sustainable by Design* (SSbD)

El marco SSbD introduce un cambio conceptual significativo en la manera en que se desarrollan materiales avanzados. Frente a enfoques lineales tradicionales, propone un modelo iterativo en el que el diseño y la evaluación se retroalimentan continuamente. Esto implica que los resultados obtenidos en las fases de evaluación puedan emplearse para modificar y optimizar el diseño del material antes de su implementación. (Figura 1)

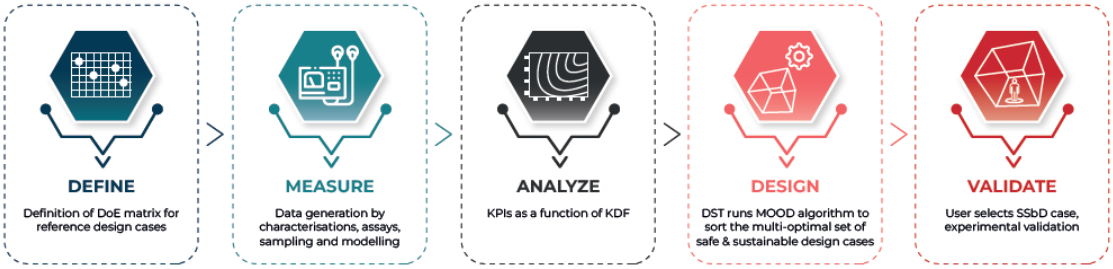



**Figura 1.** Esquema conceptual de la metodología de evaluación SSbD en el proyecto INTEGRANO.

Uno de los pilares fundamentales de este enfoque es la consideración del ciclo de vida completo del producto, desde la síntesis del nanomaterial hasta su uso y su gestión al final de su vida útil. Este planteamiento permite identificar de forma más precisa los posibles impactos asociados a cada fase, así como las rutas de exposición más relevantes.

### Metodología integrada del proyecto INTEGRANO

La metodología desarrollada en INTEGRANO se basa en la integración de información procedente de distintas fuentes y disciplinas, con el fin de construir un modelo coherente que permita evaluar el comportamiento de los nanomateriales en condiciones realistas. (Figura 2)

El punto de partida del modelo lo constituyen los denominados *Key Decision Factors* (KDFs), que incluyen variables relacionadas con la composición del material, los parámetros de procesado y las condiciones de uso. Estas variables son utilizadas como entrada en distintos modelos de evaluación que generan un conjunto de indicadores o *Key Performance Indicators* (KPIs), representativos de las diferentes dimensiones del enfoque SSbD [3].

Entre estos indicadores se incluyen parámetros relacionados con la toxicidad, la exposición [5], el impacto ambiental, el coste o la funcionalidad del material. La integración de estos resultados se realiza mediante una plataforma digital de apoyo a la decisión, que permite analizar simultáneamente múltiples alternativas de diseño.

Un elemento clave de esta metodología es la incorporación de técnicas de optimización multiobjetivo, implementadas mediante el algoritmo MOOD (Multi Objective Optimisation Design), que permite identificar soluciones que representan el mejor compromiso entre diferentes criterios, evitando la optimización parcial de una única dimensión en detrimento del resto.

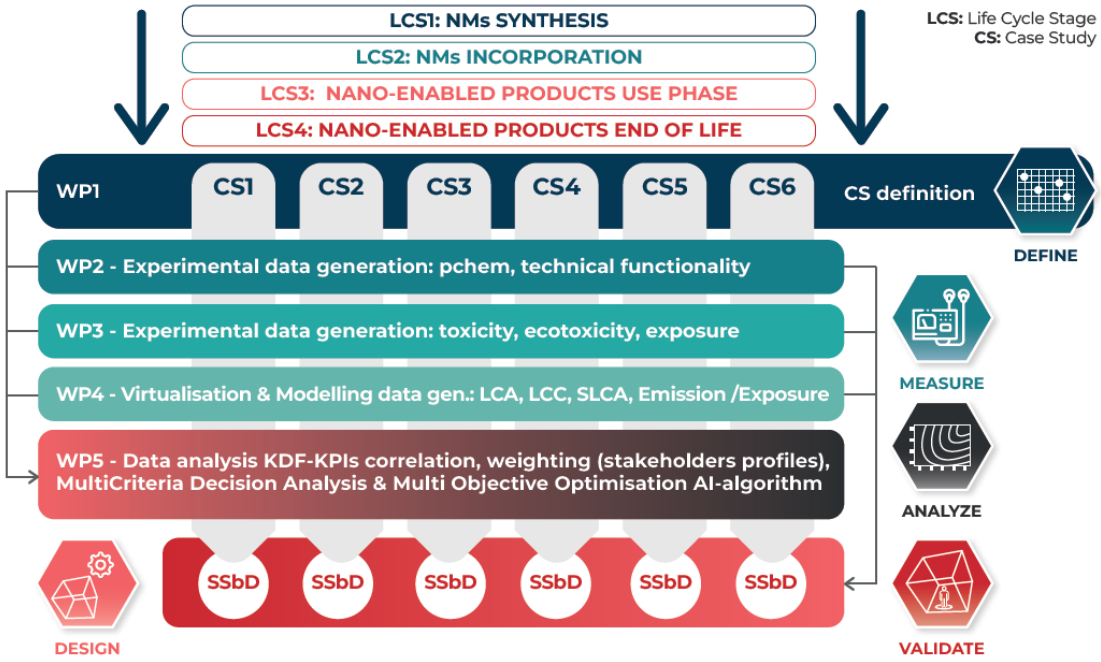



**Figura 2.** Arquitectura del sistema INTEGRANO.

## Evaluación basada en ciclo de vida

Uno de los aspectos más relevantes del proyecto INTEGRANO es la evaluación de los nanomateriales en escenarios reales de ciclo de vida [4]. Este enfoque permite considerar no solo las propiedades intrínsecas del material, sino también su comportamiento en condiciones operativas reales.

De esta manera, se analizan aspectos como la posible liberación de nanopartículas durante los procesos de producción, el uso del producto o su eliminación, así como las

condiciones de exposición asociadas a cada una de estas fases. La integración de estos elementos permite obtener una visión más precisa de los riesgos potenciales y facilita la identificación de puntos críticos en la cadena de valor.

### Casos de estudio del proyecto INTEGRANO

Con el objetivo de validar la metodología desarrollada, el proyecto se estructura en torno a seis casos de estudio que cubren diferentes sectores industriales y escenarios de aplicación. Estos casos incluyen aplicaciones en textiles antimicrobianos, membranas para tratamiento de agua, materiales espumados basados en poliuretano, sistemas de filtración de aire, envases alimentarios y productos cosméticos. (Figura 3)

La selección de estos casos responde a la necesidad de abordar una amplia variedad de condiciones de uso, tipos de exposición y comportamientos de los nanomateriales en matrices distintas. De este modo, se pueden analizar tanto escenarios dominados por la exposición inhalatoria como situaciones donde predomina el contacto dérmico o la interacción con el medio acuático.

Asimismo, estos casos permiten evaluar la aplicabilidad del enfoque SSbD en diferentes niveles de madurez tecnológica, desde desarrollos experimentales hasta aplicaciones más cercanas al mercado.

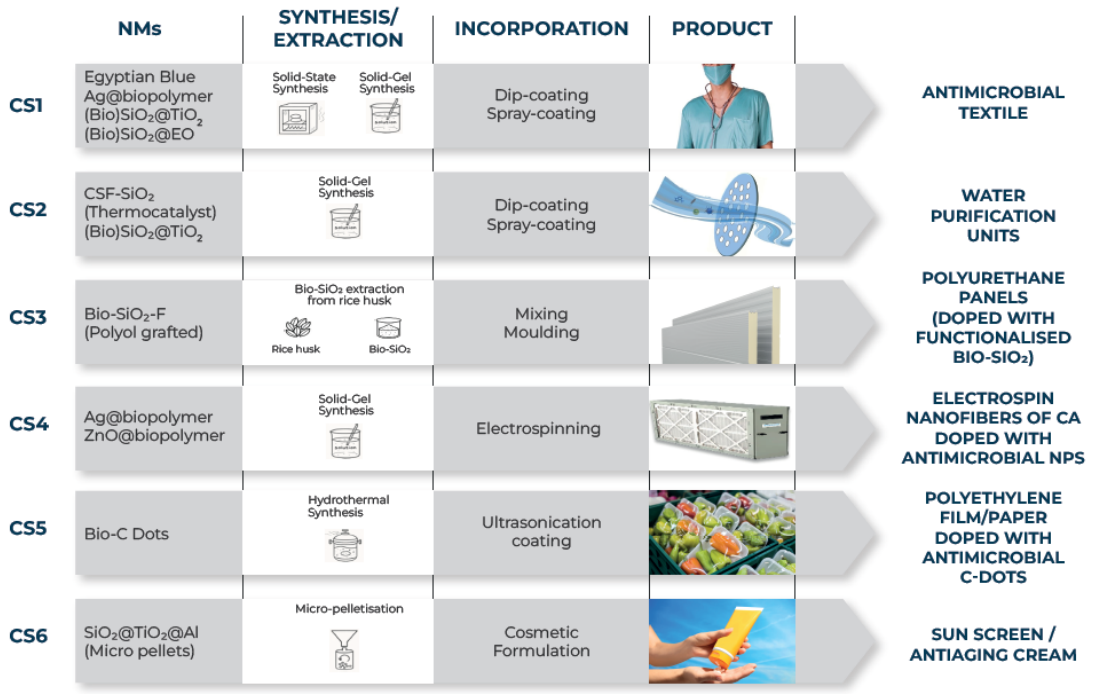



**Figura 3.** Casos de estudio de INTEGRANO y principales cadenas de valor.

### Integración y optimización multiobjetivo

La integración de los resultados obtenidos en las distintas fases de evaluación permite realizar un análisis conjunto que facilita la toma de decisiones. En este contexto, el uso de algoritmos de optimización multiobjetivo resulta especialmente relevante, ya que posibilita la identificación de soluciones que equilibran adecuadamente diferentes criterios. (Figura 4)

Este enfoque permite visualizar el conjunto de soluciones viables en términos de compromisos entre dimensiones como seguridad, funcionalidad o impacto ambiental,

facilitando la selección de aquellas opciones que mejor se adaptan a los objetivos definidos.

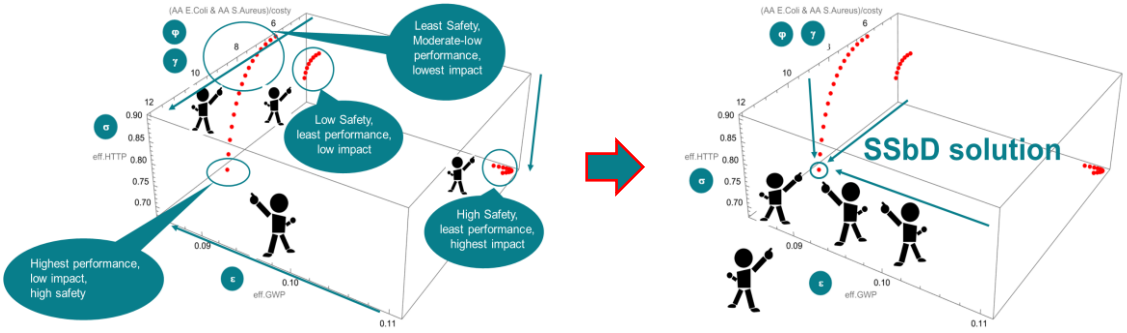



**Figura 4.** Representación conceptual de la optimización multiobjetivo para identificar soluciones que representan el mejor compromiso entre diferentes criterios según el marco SSbD.

### Valor añadido del enfoque INTEGRANO

El enfoque desarrollado en INTEGRANO aporta un valor significativo al integrar datos experimentales con herramientas de modelización avanzada y sistemas de apoyo a la decisión. Esta integración permite reducir la incertidumbre asociada al comportamiento de los nanomateriales y facilita su evaluación en condiciones realistas.

Además, la metodología desarrollada tiene un alto potencial de transferencia tanto a nivel industrial como regulatorio, contribuyendo al desarrollo de marcos más robustos para la evaluación de materiales avanzados y favoreciendo la adopción del enfoque SSbD en diferentes sectores.

## CONCLUSIONES

El enfoque *Safe and Sustainable by Design* representa una evolución necesaria en el desarrollo de nanomateriales, permitiendo integrar de manera efectiva criterios de seguridad y sostenibilidad desde las fases iniciales del diseño.

El proyecto INTEGRANO demuestra la viabilidad de este enfoque mediante el desarrollo de una metodología cuantitativa integrada que combina datos experimentales, modelos predictivos y herramientas digitales. La aplicación de esta metodología a diferentes casos de estudio pone de manifiesto su flexibilidad y su capacidad para adaptarse a distintos contextos industriales.

En este sentido, INTEGRANO constituye un paso relevante hacia la consolidación de herramientas que permitan facilitar la toma de decisiones en el desarrollo de materiales avanzados, alineando la innovación tecnológica con los requisitos de sostenibilidad y seguridad.

## AGRADECIMIENTOS

Financiado por la Unión Europea bajo el GA número 101138414- Proyecto INTEGRANO.

Funded by
the European Union

## REFERENCIAS

[1] European Commission (2022). *Safe and Sustainable by Design framework*. *https://research-and-innovation.ec.europa.eu*

[2] European Commission (2020). *Chemicals Strategy for Sustainability: Towards a Toxic-Free Environment.*
*https://ec.europa.eu/environment/strategy/chemicals-strategy_en*

[3] Grieger, Khara D.; Hansen, Steffen F.; Baun, Anders (2019). "The use of problem formulation for nanomaterial risk assessment and governance". *Environmental Science: Nano*, v. 6, n. 4, p.p. 1122–1133.
http://dx.doi.org/10.1039/C8EN01243K

[4] Hjorth, Rune; van Hove, Lies; Wickson, Fern (2017). "What can nanosafety learn from sustainability science?". *Journal of Cleaner Production*, v. 162, n. 1, p.p. 1557–1565.
http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.108

[5] Koivisto, Antti J.; Jensen, Kristina A.; Levin, Marcus et al. (2021). "Exposure assessment of airborne nanomaterials: Current knowledge and challenges". *Annals of Work Exposures and Health*, v. 65, n. 1, p.p. 35–52.
http://dx.doi.org/10.1093/annweh/wxaa068

# Desarrollo de un algoritmo en Python para el stitching de imágenes topográficas de interferometría óptica

**Domingo Arlandis, Víctor [(1)], Sánchez-Caballero, Samuel [(2)], Sellés Cantó, Miguel Ángel [(3)], Oliver Borrachero, Bernardo Antonio [(4)]**

*(1) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, vdomarl@epsa.upv.es*

*(2) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, sasanca@dimm.upv.es*

*(3) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, maselles@dimm.upv.es*

*(4) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell 1, 03801 Alcoy, España, berolbor@epsa.upv.es*

## RESUMEN

La caracterización topográfica mediante interferometría óptica es una herramienta fundamental en el análisis de superficies y estudios tribológicos. Sin embargo, la limitación del campo de visión en los objetivos de gran aumento requiere la captura de múltiples imágenes adyacentes para evaluar áreas extensas, como las huellas de desgaste macroscópicas en probetas de ensayo. El presente trabajo detalla el desarrollo de un algoritmo de código abierto basado en Python para realizarla unión de matrices de datos topográficos (*stitching*). El código desarrollado supera las limitaciones de las licencias de software privativo, permitiendo la reconstrucción de áreas de gran tamaño. La principal aportación metodológica del algoritmo radica en su capacidad para corregir dinámicamente el desfase en el eje Z durante el solapamiento, calculando el promedio de las zonas comunes y aplicando una nivelación global mediante el método de mínimos cuadrados. Esta herramienta permite procesar eficientemente mapas topográficos de alta resolución, evitando escalones artificiales en las uniones y facilitando la posterior aplicación de filtros de forma y rugosidad sin artefactos en los bordes.

**Palabras clave:** Interferometría óptica, perfilometría, stitching, Python, topografía.

## INTRODUCCIÓN

El análisis del desgaste superficial y la caracterización topográfica en la ciencia de materiales e ingeniería de superficies exigen técnicas de medición precisas y no destructivas [1]. La interferometría óptica destaca como una de las metodologías más robustas, permitiendo obtener mapas topográficos en 3D con resolución nanométrica [2]. No obstante, al trabajar con huellas de desgaste macroscópicas o superficies que exceden el campo de visión (FOV) de los objetivos de gran aumento, es necesario capturar múltiples imágenes adyacentes que posteriormente deben ser unidas mediante *stitching* [3].

El principal desafío en este proceso radica en la alineación y la corrección de las desviaciones en el eje Z generadas por la inclinación geométrica de la muestra o por las tolerancias mecánicas de los motores de desplazamiento del equipo [4]. Aunque existen soluciones comerciales para solventar este problema, el uso de software privativo suele estar restringido por licencias de elevado coste, limitando la accesibilidad y la automatización del procesamiento de datos a gran escala. Por ello, el desarrollo de herramientas de código abierto basadas en lenguajes de alto nivel como Python se presentan como una alternativa eficiente y flexible [5].

## METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL ALGORITMO

### Adquisición de datos experimentales

Para la validación de la metodología propuesta, se analizaron huellas de desgaste macroscópicas sobre probetas de ensayo estándar. La topografía superficial se adquirió mediante un interferómetro óptico, programando un patrón de adquisición matricial con un solapamiento del 20% entre las imágenes adyacentes, garantizando una zona común suficiente para el posterior alineamiento topográfico [3].

Cada captura individual fue preprocesada en el software nativo del equipo, Profilm, mediante la aplicación de un filtro espacial (*spatial filter*) y una interpolación de píxeles no válidos (*fill invalids*), eliminando así posibles vacíos de información derivados de pérdidas de reflexión óptica (Figura 1). Finalmente, las topografías individuales se exportaron como matrices de datos en formato de texto plano (.txt).

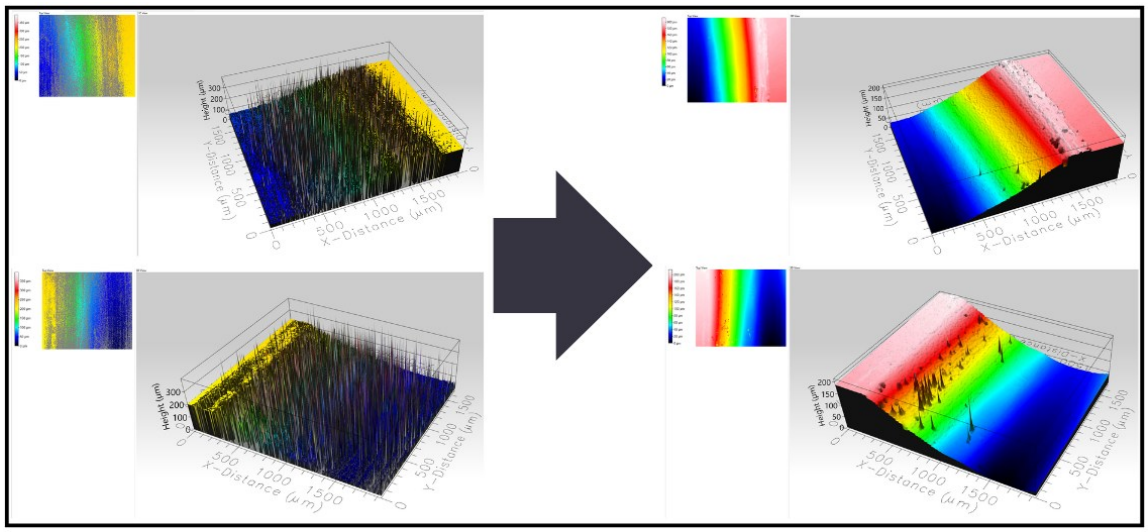



**Figura 1.** Antes y después del procesado de imágenes.

## Estructura y lógica del algoritmo

El script desarrollado y depurado utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) PyCharm Community Edition 2025.1.1.1, automatiza la lectura secuencial de los archivos generados mediante el uso de librerías especializadas en el manejo de matrices y computación científica. La arquitectura del programa se apoya en los siguientes módulos clave:

- Tkinter: Gestión de la interfaz gráfica para la selección interactiva de la carpeta de trabajo.
- re: Extracción y ordenamiento de las coordenadas espaciales grabadas en los nombres de los archivos mediante expresiones regulares.
- NumPy: Motor numérico empleado para el procesamiento matricial y la corrección de altura en las zonas comunes [6].
- Matplotlib: Generación de mapas bidimensionales para la inspección visual previa a la exportación [7].

El flujo computacional se divide en tres etapas:

1. Lectura y ordenamiento: El código extrae las coordenadas espaciales del nombre de cada archivo y ordena las imágenes para su procesamiento secuencial (de izquierda a derecha y de arriba a abajo).
2. Generación del lienzo y corrección Z: Se calcula el área total de la superficie escaneada en función del tamaño del píxel y se genera un lienzo virtual global. Al proyectar cada matriz sobre el lienzo, el algoritmo identifica el área de solapamiento (20%) con las mallas adyacentes previamente procesadas. Seguidamente, calcula el valor medio de altura (Z) en ambas áreas comunes y aplica una compensación dinámica (offset) al nuevo bloque de datos, igualando los niveles y evitando la aparición de saltos o escalones topográficos (Figura 2).

```
# Zona de solapamiento: Donde el peso > 0
overlap_mask = current_weight_slice > 0

if np.any(overlap_mask):
    # Calcular promedio del lienzo en esa zona


    mean_canvas = np.mean(current_canvas_slice[overlap_mask] / current_weight_slice[overlap_mask])
    # Calcular promedio de la NUEVA imagen en esa misma zona
    mean_new = np.mean(data[overlap_mask])

    # El desfase es la diferencia. Lo corregimos.
    offset = mean_canvas - mean_new
    data += offset
    # print(f" -> Img {entry['file']}: Ajuste Z aplicado de {offset:.4f} um")
```

**Figura 2**. Fragmento del código fuente implementado en PyCharm para el cálculo del offset y la compensación dinámica de altura en el eje Z.

3. Ensamblaje y exportación: Una vez unida la matriz completa y compensados los desfases locales en Z, se genera un mapa topográfico continuo en 2D (Figura 3). Este resultado global se exporta de nuevo a formato de texto (.txt) para ser reintroducido en el software de análisis topográfico, donde se aplican finalmente las rutinas de aplanado conjunto y eliminación de forma sobre la geometría completa de manera unificada.

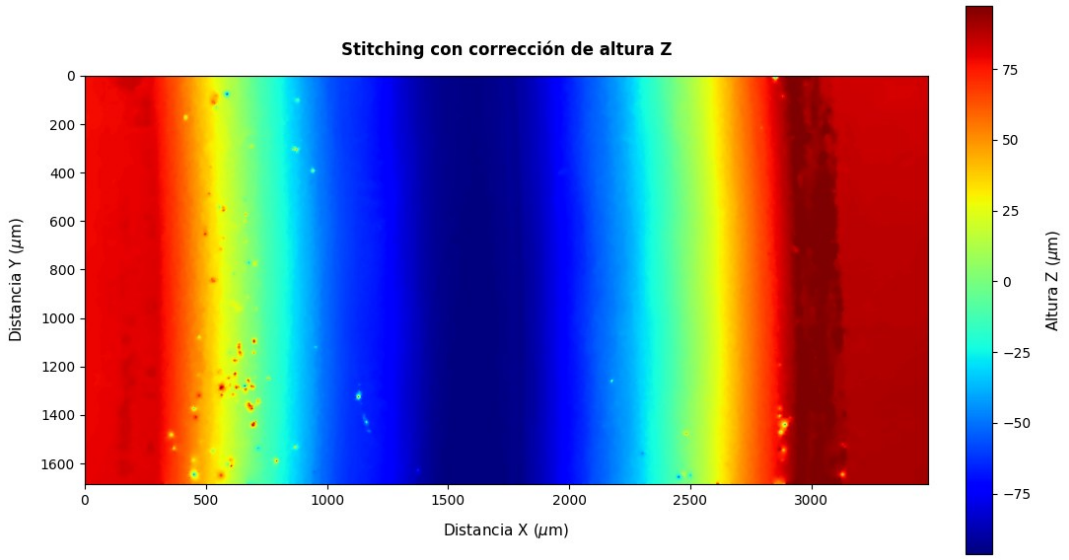



**Figura 3.** Mapa topográfico bidimensional generado en el entorno de Python, mostrando la matriz global unificada tras la corrección dinámica de altura Z.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo desarrollado demostró ser altamente efectivo para el ensamblaje de matrices topográficas. Al procesar las capturas parciales de las huellas de desgaste, el código logró reconstruir la geometría completa de forma continua. Como se observa en la Figura 4, mediante la representación gráfica de mapas de color generados por computación visual, la transición entre las diferentes zonas de solapamiento resulta imperceptible, sin que se aprecien discontinuidades artificiales en las uniones.

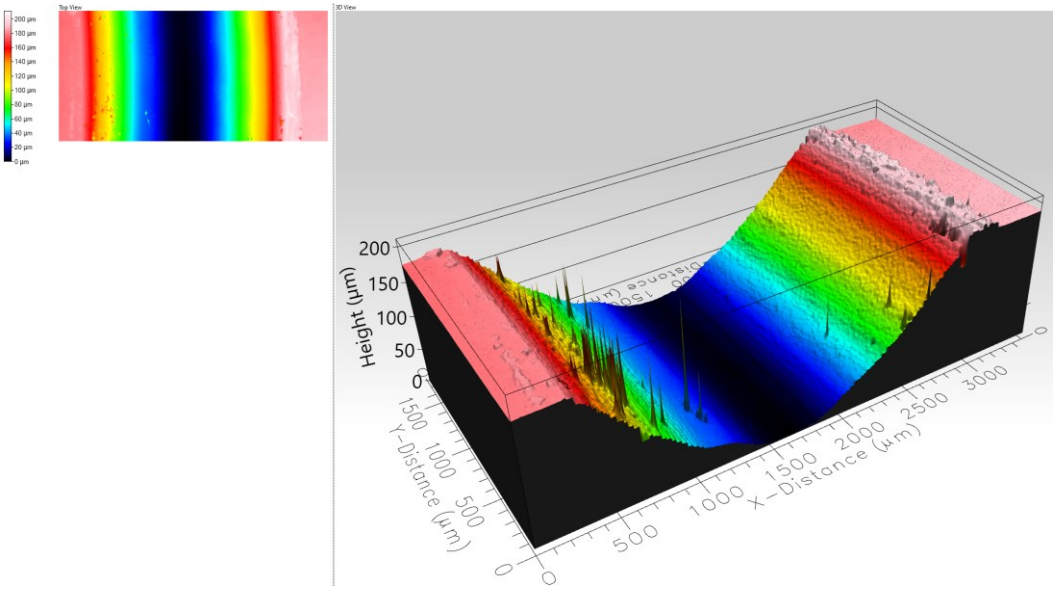



**Figura 4.** Importación exitosa de la matriz de datos global en el software de análisis comercial para su visualización 3D y evaluación del desgaste.

La corrección dinámica del desfase en el eje Z durante la ejecución del *script* permitió unificar el nivel de referencia de todas las capturas individuales. Posteriormente, la lectura del archivo global (.txt) resultante en el software de análisis comercial se realizó sin errores de compatibilidad. Esto permitió aplicar con éxito las herramientas de aplanado conjunto sobre toda la extensión de la huella, validando la integridad geométrica de la matriz generada y confirmando la idoneidad del método para facilitar la medición precisa de volúmenes de desgaste en áreas extensas.

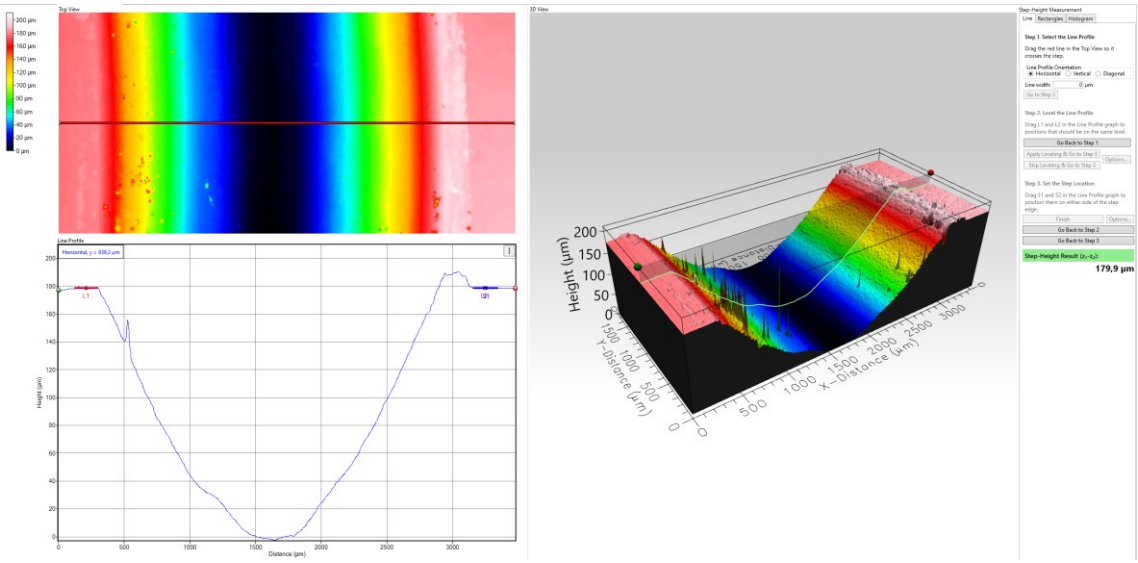



**Figura 5.** Medición de la altura de la huella después de hacerle todo el procesado.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de este algoritmo de *stitching* en Python ha demostrado ser una solución robusta y eficiente para la superación de las limitaciones inherentes al software privativo de los equipos de perfilometría óptica. La metodología implementada permite la reconstrucción topográfica de áreas extensas mediante la corrección dinámica del desfase en el eje Z durante la etapa de ensamblaje. Esto garantiza una topografía continua y sin escalones artificiales en las zonas de solapamiento. El uso de herramientas de programación de código abierto no solo optimiza el flujo de trabajo en la caracterización de huellas de desgaste macroscópicas, sino que asegura la compatibilidad de los datos exportados con el software comercial para la posterior aplicación de rutinas de aplanado y análisis tribológico unificado.

## REFERENCIAS

[1] Gadelmawla, Abdel-Monem; Koura, Mohamed (2002). "Roughness parameters". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, n. 1, p.p. 133-145. http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2

[2] De Groot, Peter (2011). "Principles of interference microscopy for surface metrology". *Advances in Optics and Photonics*, v. 3, n. 2, p.p. 127-155. http://dx.doi.org/10.1364/AOP.3.000127

[3] Leach, Richard; Haitjema, Han (2014). "Stitching algorithms for linear and areal surface topography instruments". *Measurement Science and Technology*, v. 25, n. 6, p.p. 062001. http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/062001

[4] Blunt, Liam; Jiang, Xiangqian (2003). "Advanced techniques for assessment surface topography". *Kogan Page Science*, v. 1, n. 1, p.p. 45-68. ISBN: 1903996112

[5] Van Rossum, Guido; Drake, Fred L. (2009). "Python 3 Reference Manual". *CreateSpace*, v. 1, n. 1, p.p. 35-42. ISBN: 9781441412690

[6] Harris, Charles R.; Millman, K. Jarrod (2020). "Array programming with NumPy". *Nature*, v. 585, n. 7825, p.p. 357-362. http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

[7] Hunter, John D. (2007). "Matplotlib: A 2D graphics environment". *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p.p. 90-95. http://dx.doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

# Microscopía electrónica de barrido como herramienta cualitativa para la caracterización morfológica de fibras de algodón reciclado mecánicamente

**Fabra-Regalado, Marta[(1)], Otero-Camaño, Sabela[(1)], Jordán-Núñez, Jorge[(2)], López-Rodriguez, Daniel[(3)], Micó-Vicent, Bàrbara[(2)]**

*(1) Escuela de Doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, mfabreg@doctor.upv.es, sotecam@doctor.upv.es*

*(2) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

## RESUMEN

El uso de algodón reciclado mecánicamente constituye una vía relevante para avanzar hacia modelos textiles más circulares. Sin embargo, su caracterización técnica continúa siendo compleja, ya que actualmente no existe un método único y normalizado capaz de diferenciar de forma directa e inequívoca el algodón reciclado del algodón virgen. En este contexto, la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo, FESEM, puede aportar información cualitativa complementaria sobre la morfología superficial y el estado estructural de las fibras. En este trabajo se comparan fibras de algodón virgen y fibras de algodón reciclado mecánicamente en tres variantes de referencia: natural, negro e índigo. Para ello, se propone una matriz cualitativa de evaluación basada en una escala ordinal de 0 a 4 aplicada a criterios como continuidad fibrilar, convoluciones, homogeneidad superficial, integridad de pared celular, rugosidad, extremos irregulares, delaminación/fibrilación y heterogeneidad del conjunto. Los resultados muestran que las fibras recicladas presentan mayor variabilidad morfológica y rasgos compatibles con procesos de desfibrado mecánico. La técnica FESEM no permite verificar por sí sola el origen reciclado, pero sí contribuye a identificar y comparar rasgos morfológicos diferenciales.

**Palabras clave:** Algodón reciclado, FESEM, Reciclaje mecánico, Morfología fibrilar, Caracterización cualitativa.

## INTRODUCCIÓN

La valorización de residuos textiles como materia prima secundaria es clave en la transición hacia modelos textiles más circulares. En este contexto, el reciclaje mecánico de algodón constituye una vía industrialmente accesible para recuperar fibras celulósicas sin procesos de disolución química o regeneración. Sin embargo, el material obtenido presenta elevada variabilidad asociada al residuo de partida y al desfibrado mecánico. Diversos estudios han señalado que el reciclaje mecánico puede inducir reducción de longitud efectiva, aumento de fibras cortas, irregularidades superficiales, neps, restos no abiertos y extremos asociados al desgarro mecánico [1,2]. Esta heterogeneidad dificulta la comparación entre algodones vírgenes y reciclados mediante un único parámetro instrumental. Además, no existe actualmente un ensayo único y normalizado que diferencie de forma directa e inequívoca el algodón reciclado mecánicamente del algodón virgen.

Por ello, los enfoques recientes combinan técnicas complementarias. Ten Berge et al. proponen una aproximación tipo *toolbox* para verificar presencia, cantidad y origen de fibras de algodón reciclado, integrando observación microscópica, distribución de longitud y grado de polimerización [3]. Aunque este trabajo no persigue verificar el origen del material, adopta esta lógica como herramienta complementaria de caracterización morfológica. La microscopía electrónica de barrido de emisión de campo, FESEM, permite observar topografía superficial, continuidad de pared celular, convoluciones, rugosidad, fibrilación, microfisuras, extremos irregulares o delaminación localizada [4,5]. Estos rasgos no constituyen una prueba concluyente del origen reciclado, pero aportan evidencias útiles para comparar fibras vírgenes y recicladas. Este trabajo propone una matriz cualitativa basada en FESEM aplicada a algodón virgen y algodón reciclado natural, negro e índigo.

## OBJETIVOS

La hipótesis de partida es que las fibras de algodón reciclado mecánicamente presentan rasgos morfológicos diferenciales respecto al algodón virgen, observables mediante FESEM y asociados al desfibrado mecánico y al historial previo del residuo textil. El objetivo general es evaluar la utilidad de FESEM como herramienta cualitativa para comparar la morfología de algodón virgen y algodón reciclado natural, negro e índigo.

Los objetivos específicos son; comparar mediante FESEM la morfología del algodón virgen y de fibras de algodón reciclado mecánicamente en variantes natural, negra e índigo. Definir una matriz cualitativa de evaluación SEM basada en rasgos morfológicos observables y una escala ordinal de 0 a 4. Valorar la utilidad de esta matriz como herramienta complementaria para identificar y comparar rasgos morfológicos diferenciales en fibras recicladas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Se analizaron cuatro tipologías de fibra de algodón en condición de referencia: una muestra de algodón virgen y tres muestras de algodón reciclado mecánicamente clasificadas según la coloración intrínseca heredada del residuo textil original. Las fibras recicladas proceden de flujos de residuos textiles postindustriales procesados mediante reciclaje mecánico, mientras que el algodón virgen se empleó como referencia morfológica de comparación.

**Tabla 1**. Muestras analizadas mediante FESEM.

| Código | Material | Descripción |
|---|---|---|
| M1 | Algodón virgen | Fibra virgen utilizada como referencia morfológica. |
| M7 | Algodón reciclado natural | Fibra reciclada de residuo postindustrial de tejido de punto blanqueado sin agentes ópticos. |
| M13 | Algodón reciclado negro | Fibra reciclada de residuo postindustrial teñido y segregado en color negro. |
| M19 | Algodón reciclado índigo | Fibra reciclada de residuo postindustrial segregado en color índigo, sin postratamiento. |

Esta selección permite comparar una fibra no reciclada con tres variantes representativas del desfibrado mecánico diferenciadas por su origen cromático y su historial previo de procesado textil.

**Preparación de muestras y análisis FESEM**

Los análisis se realizaron en el Servicio de Microscopía de la Universitat Politècnica de València, UPV, mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, FESEM, modelo ULTRA 55, ZEISS, equipado con detector de electrones secundarios SE2. Las muestras se fijaron sobre cinta conductora de carbono de doble cara en portamuestras metálicos. Durante la preparación se emplearon guantes, se eliminó el material no adherido mediante aire suave y se recortó el exceso de muestra. Dado el carácter no conductor de las fibras textiles, las muestras se recubrieron con oro, Au, mediante *sputtering* en bajo vacío, utilizando argón como gas de trabajo y una presión previa aproximada de $5 \times 10^{-1}$ mbar. Las condiciones operativas fueron: apertura de diafragma de 20 µm, energía del haz de 3 kV, distancia de trabajo, WD, de 8 mm, y adquisición de imágenes a 200× y 800×. Para estructurar la interpretación morfológica se definió una matriz cualitativa con escala ordinal de 0 a 4, orientada a graduar la presencia e intensidad de rasgos observables en las micrografías FESEM.

**Tabla 2.** Escala ordinal de evaluación SEM.

| Valor | Interpretación |
|---|---|
| 0 | Sin evidencia del rasgo o condición equivalente a referencia óptima. |
| 1 | Rasgo leve, puntual o presente en menos del 10 % del campo observado. |
| 2 | Rasgo moderado, frecuente o presente entre el 10 % y el 30 % del campo observado. |
| 3 | Rasgo alto, dominante o presente entre el 30 % y el 60 % del campo observado. |
| 4 | Rasgo severo, generalizado o presente en más del 60 % del campo, con pérdida clara de integridad. |

La matriz se aplicó a ocho criterios principales por su relevancia en la comparación entre algodón virgen y algodón reciclado mecánicamente. La evaluación consideró dos rangos de aumento: 100-200× para la organización global del conjunto fibrilar y 500–1000× para la topografía superficial y la pared celular.

**Tabla 3.** Criterios SEM utilizados en la matriz cualitativa.

| Código | Criterio | Aumento preferente | Función interpretativa |
|---|---|---|---|
| C1 | Continuidad fibrilar | 100–200× | Evalúa integridad longitudinal y presencia de fibras rotas o acortadas. |
| C2 | Convoluciones | 500–1000× | Valora la preservación de la morfología típica en cinta helicoidal del algodón. |
| C3 | Homogeneidad superficial/cutícula | 500–1000× | Evalúa uniformidad externa, zonas parcheadas, erosión o pérdida de continuidad. |
| C4 | Integridad de pared celular | 500–1000× | Identifica microfisuras, escisión longitudinal (*splitting*) y pérdida localizada de cohesión. |
| C5 | Rugosidad topográfica | 500–1000× | Describe aspereza, escamosidad y alteraciones del relieve superficial. |
| C6 | Extremos irregulares | 100–1000× | Detecta evidencias de corte, desgarro o desfibrado mecánico. |
| C7 | Delaminación/fibrilación | 500–1000× | Evalúa separación laminar, *peeling* y levantamiento microfibrilar visible. |
| C8 | Heterogeneidad del conjunto | 100–200× | Evalúa dispersión de longitudes, variabilidad morfológica y restos no abiertos. |

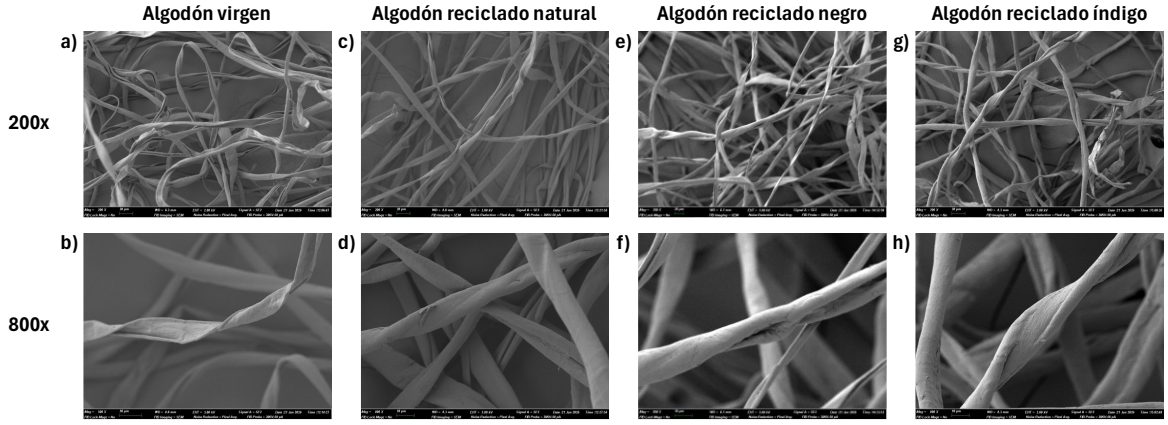
La matriz se plantea como apoyo cualitativo a la observación, no como método cuantitativo validado ni como procedimiento de certificación del contenido reciclado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comparación morfológica mediante FESEM

La comparación de las micrografías FESEM permitió identificar diferencias morfológicas entre el algodón virgen y las tres tipologías de algodón reciclado. Las imágenes de bajo aumento evidenciaron variaciones en la organización del entramado fibrilar, mientras que las de alta magnificación permitieron analizar la topografía superficial, las discontinuidades y la conservación de la morfología típica del algodón.

**Figura 1.** Micrografías FESEM de fibras de algodón virgen y algodón reciclado mecánicamente en condición de referencia: *a–b) algodón virgen; c–d) algodón reciclado natural; e–f) algodón reciclado negro; g–h) algodón reciclado índigo.*




### Algodón virgen como referencia morfológica

El algodón virgen presentó una morfología compatible con la estructura típica del algodón, con configuración en cinta colapsada, convoluciones reconocibles y superficie relativamente homogénea. A bajo aumento, el entramado fibrilar mostró una organización continua, con baja fragmentación y menor dispersión de longitudes. A alta magnificación, se observó escasa presencia de discontinuidades, microfisuras o extremos irregulares. Por ello, los criterios de continuidad fibrilar, convoluciones, homogeneidad superficial e integridad de pared celular se sitúan en valores bajos de la escala propuesta, próximos a 0–1.

### Algodón reciclado natural

El algodón reciclado natural mostró mayor heterogeneidad fibrilar que el algodón virgen. A bajo aumento se identificó mayor dispersión visual de longitudes, fibras de continuidad variable y organización menos uniforme del entramado, compatible con procesos de apertura y desfibrado mecánico. A alta magnificación, se observaron irregularidades superficiales, rugosidad, discontinuidades localizadas y extremos compatibles con desgarro o separación mecánica. Aunque conserva rasgos propios del algodón, como la morfología tipo cinta, presenta mayor alteración superficial y heterogeneidad del conjunto. En la matriz SEM, esta muestra tendería a puntuaciones moderadas en continuidad fibrilar, homogeneidad superficial, extremos irregulares y heterogeneidad.

### Algodón reciclado negro

El algodón reciclado negro presentó una red fibrilar heterogénea, con fibras finas, segmentos colapsados y variabilidad en la continuidad del entramado. A bajo aumento, la distribución fue menos uniforme que en el algodón virgen, aunque mantuvo una morfología general compatible con fibras celulósicas. A alta magnificación, se observaron discontinuidades superficiales y alteraciones topográficas de la pared celular, posiblemente asociadas al desfibrado mecánico y al historial previo del residuo. Dado el enfoque descriptivo del trabajo, no se establece una relación causal directa entre coloración negra, tratamientos previos y morfología observada.

### Algodón reciclado índigo

El algodón reciclado índigo mostró elevada heterogeneidad fibrilar. A bajo aumento se observaron fibras de distinta continuidad y morfología, junto con posibles fragmentos o restos no completamente abiertos. Esta configuración es coherente con su origen como residuo segregado en color índigo, aunque no permite confirmar por sí sola dicho origen. A alta magnificación, la fibra mantuvo rasgos propios del algodón, como configuración tipo cinta y zonas de colapso, pero también discontinuidades longitudinales y variaciones locales en la pared celular. En la matriz SEM, tendería a presentar puntuaciones moderadas o altas en heterogeneidad, continuidad fibrilar y extremos irregulares.

### Aplicación de la matriz cualitativa

La Tabla 4 recoge la aplicación preliminar de la matriz cualitativa a las cuatro familias de fibras. Los valores se expresan como rangos orientativos, basados en observación morfológica de campos representativos y no en cuantificación automatizada de imagen.

**Tabla 4.** Aplicación preliminar de la matriz cualitativa SEM a las muestras de referencia.

| Criterio | Algodón virgen | Reciclado natural | Reciclado negro | Reciclado índigo |
|---|---|---|---|---|
| C1 | 0–1 | 2 | 2 | 2–3 |
| C2 | 0–1 | 1–2 | 1–2 | 1–2 |
| C3 | 0–1 | 2 | 2 | 2 |
| C4 | 0–1 | 2 | 2 | 2 |
| C5 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| C6 | 0–1 | 2–3 | 2 | 2–3 |
| C7 | 0–1 | 1–2 | 1–2 | 1–2 |
| C8 | 1 | 2–3 | 2–3 | 3 |

La matriz muestra que el algodón virgen presenta puntuaciones bajas, asociadas a mayor continuidad fibrilar, superficie más homogénea y mejor preservación de la morfología típica. En cambio, las muestras recicladas presentan puntuaciones superiores en heterogeneidad, extremos irregulares, rugosidad y discontinuidades superficiales.

Estos resultados no verifican directamente el origen reciclado, sino que describen de forma estructurada rasgos morfológicos compatibles con procesos de reciclaje mecánico. La matriz reduce la subjetividad de la observación y ordena los criterios de comparación.

### Alcance y limitaciones de la herramienta propuesta

La herramienta propuesta complementa la caracterización de fibras recicladas al documentar diferencias morfológicas frente al algodón virgen, aunque su alcance debe delimitarse. La observación FESEM no cuantifica el porcentaje de algodón reciclado en una mezcla ni verifica su origen. Los rasgos observados pueden depender del residuo, tejido inicial, historial de tintura o acabado, intensidad de apertura y preparación de muestra. La matriz requiere validación futura con más muestras, observadores independientes y correlación con técnicas físico-mecánicas o análisis de imagen. Su valor reside en aportar información morfológica complementaria a métodos de longitud, neps, composición o trazabilidad.

## CONCLUSIONES

La microscopía electrónica de barrido de emisión de campo permite comparar rasgos morfológicos diferenciales entre algodón virgen y algodón reciclado mecánicamente. El algodón virgen mostró mayor continuidad fibrilar, convoluciones reconocibles y superficie más homogénea, por lo que constituye una referencia útil. Las fibras de algodón reciclado natural, negro e índigo presentaron mayor heterogeneidad, extremos irregulares, discontinuidades superficiales y alteraciones topográficas compatibles con apertura y desfibrado mecánico.

La matriz cualitativa propuesta, basada en una escala ordinal de 0 a 4, permite ordenar la observación FESEM y estructurar la comparación entre tipologías de fibra. FESEM debe considerarse una técnica complementaria: no verifica por sí sola el origen reciclado ni cuantifica su proporción en una mezcla, pero aporta información relevante sobre el estado estructural de la fibra.

## REFERENCIAS

[1] Ütebay, B.; Çelik, P.; Çay, A. (2019). “Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality”. Journal of Cleaner Production, v. 222, p.p. 29-35. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.033

[2] Lindström, K.; van der Holst, F.; Berglin, L.; Persson, A.; Kadi, N. (2024). “Mechanical textile recycling efficiency: Sample configuration, treatment effects and fibre opening assessment”. Results in Engineering, v. 24, p.p. 1-10. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103252

[3] Ten Berge, A. B. G. M.; Temmink, R.; Kuppen, M.; van Slagmaat, M. B.; Kamphuis, S.; Groeneveld, R. A. J.; Luiken, A.; Oelerich, J.; Mahy, J. W. G. (2026). “An analytical toolbox to verify the presence, quantity and origin of recycled cotton fibres in textile garments”. Scientific Reports, v. 16, n. 8999. https://doi.org/10.1038/s41598-026-39268-y

[4] He, Z.; Cheng, H. N.; Klasson, K. T.; Olanya, O. M.; Uknalis, J.; Xu, J.; Zhang, X. (2021). “Surface and thermal characterization of cotton fibers of phenotypes differing in fiber length”. Polymers, v. 13, n. 7. https://doi.org/10.3390/polym13070994

[5] Somogyi Škoc, M.; Juran, J.; Rezić, I. (2024). “Effect of sterilization methods on chemical and physical-mechanical properties of cotton compresses”. Molecules, v. 29, n. 15. https://doi.org/10.3390/molecules29153541

# Modelo de gemelo digital AgroHub para la gestión agroclimática en sistemas de Agricultura Campesina, Indígena, Familiar y Comunitaria del Caribe colombiano

**Martínez Lengua, Antonio J.[(1)]; Taborda Giraldo, John A.[(1)]; Ferrer-Sapena, Antonia[(2)]; Peset, Fernanda[(2)]; Fernández de Córdoba, Pedro[(2)]**

*(1) Universidad del Magdalena, Facultad de Ingeniería. Santa Marta, Colombia. Amartinezl@unimagdalena.edu.co; jtaborda@unimagdalena.edu.co*

*(2) IUMPA, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. anfersa@upv.es; mpesetm@upv.es; pfernandez@mat.upv.es*

## RESUMEN

La Agricultura Campesina, Indígena, Familiar y Comunitaria (ACIFC) del Departamento del Magdalena (Colombia) enfrenta una brecha tecnológica estructural que se traduce en pérdidas postcosecha del 25 –40 % y rendimientos 2,3 veces inferiores al potencial tecnificado, en un contexto de alta vulnerabilidad climática, densidad de monitoreo agroclimático de apenas 1 estación IDEAM por cada 1.200 km² y conectividad digital inferior al 20 %. Esta comunicación presenta AgroHub Magdalena, arquitectura de gemelo digital de finca (Farm Digital Twin, FDT) diseñada específicamente para sistemas ACIFC del trópico Caribe colombiano, que integra tres capas funcionales: (i) una red de monitoreo IoT-LoRaWAN de bajo coste basada en nodos AgroHub v2.0; (ii) modelos predictivos de aprendizaje automático (LSTM, Random Forest, CNN y arquitecturas híbridas) calibrados para series temporales agroclimáticas tropicales no estacionarias; y (iii) una ontología de conocimiento ecológico local (KEL) que incorpora los saberes ancestrales de las comunidades como variable estructurada del modelo digital.

La arquitectura AgroHub constituye la primera implementación de un FDT intercultural validado en contextos ACIFC del trópico latinoamericano, con capacidad proyectada de mejora ≥20 % en la precisión de predicción agroclimática respecto a modelos univariados de referencia e impacto estimado sobre más de 300 familias productoras del Magdalena.

**Palabras clave:** gemelos digitales, IoT-LoRaWAN, Agricultura 4.0, ACIFC, aprendizaje automático, seguridad alimentaria, conocimiento ecológico local, trópico latinoamericano.

## INTRODUCCIÓN

La denominada Agricultura 4.0 ha experimentado avances notables en la optimización de sistemas productivos de gran escala en climas templados; sin embargo, su transferencia a contextos de agricultura familiar tropical enfrenta barreras estructurales documentadas sistemáticamente en la literatura especializada: costo de infraestructura, conectividad insuficiente, déficit de capacidad técnica local y ausencia de adaptación intercultural [1, 2]. En el Departamento del Magdalena (Colombia), estas barreras adquieren especial intensidad: el 87,4 % de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) tienen extensiones menores a 5 ha [3], la densidad de estaciones meteorológicas del IDEAM alcanza apenas 1 por cada 1.200 km², y solo el 19,3 % de los hogares rurales dispone de acceso a internet [4]. Más del 70 % de sus productores rurales pertenecen a

la categoría de Agricultura Campesina, Indígena, Familiar y Comunitaria (ACIFC), modelo que provee más del 70 % de los alimentos de consumo interno del país [5], cuyos rendimientos promedio de maíz (1,8 t/ha) son 2,3 veces inferiores al potencial tecnificado [6] y cuyas pérdidas postcosecha oscilan entre el 25 % y el 40 % [5], imputables en gran medida a deficiencias en la gestión agroclimática y la toma de decisiones basada en evidencia.

Los gemelos digitales —representaciones computacionales dinámicas de sistemas físicos con capacidad de simulación prospectiva y sincronización bidireccional en tiempo real [7]— constituyen el paradigma tecnológico con mayor potencial para abordar esta brecha en la agricultura familiar tropical. Verdouw et al. [8] los definen como entidades digitales que modelan la estructura, el comportamiento y los procesos de una explotación agrícola con suficiente fidelidad para permitir su simulación, optimización y predicción. La revisión sistemática de la literatura confirma, no obstante, que ningún estudio previo ha desarrollado ni validado una arquitectura FDT para sistemas ACIFC del Caribe colombiano, y ninguno ha integrado el conocimiento ecológico local (KEL) como variable ontológica estructurada en el modelo digital [8, 9]. Esta triple brecha —arquitectónica, de integración IoT-ML-KEL y de evaluación de impacto cuasi-experimental— define el espacio de contribución original del presente proyecto.

La viabilidad técnica de la propuesta se sustenta en el trabajo previo de prototipado del nodo IoT AgroHub v2.0, que generó: un prototipo funcional validado en condiciones de campo en el Magdalena, con sensores de temperatura (±0,2 °C), humedad relativa (±2 %), humedad volumétrica del suelo (±2 %), luminosidad (±5 %) y transmisión LoRaWAN de hasta 15 km, constituye la base de calibración del motor predictivo del gemelo digital, reduciendo significativamente el riesgo técnico de la fase experimental y permitiendo que el esfuerzo de la investigación se concentre en la contribución científica central: el modelado, la simulación y la validación experimental del FDT en unidades productivas ACIFC.

## OBJETIVOS

El objetivo general es desarrollar y validar una arquitectura de gemelo digital de finca (FDT) para la gestión agroclimática en unidades productivas ACIFC del Departamento del Magdalena, integrando sensores IoT, modelos de aprendizaje automático y conocimiento ecológico local, con el fin de mejorar la precisión predictiva, la toma de decisiones basada en datos y el desempeño productivo ante la variabilidad climática del trópico Caribe. Los objetivos específicos son:

(1) OE1. Caracterizar las necesidades agroclimáticas e informacionales de sistemas ACIFC mediante metodología IAP-Living Lab y análisis agroecológico participativo en tres zonas contrastantes del Departamento del Magdalena.

(2) OE2. Diseñar, desplegar y validar una red de monitoreo IoT-LoRaWAN de bajo coste basada en nodos AgroHub v2.0 (16–20 nodos), evaluando su rendimiento en la captura de series temporales agroclimáticas continuas a resolución de 15 minutos.

(3) OE3. Desarrollar y validar modelos de aprendizaje automático (LSTM, Random Forest, CNN e híbridos) para predicción agroclimática y detección fitosanitaria temprana, integrados como microservicios REST en el motor del gemelo digital.

(4) OE4. Construir y evaluar la plataforma AgroTwin para visualización en tiempo real, simulación de escenarios y generación de alertas tempranas en condiciones de baja conectividad y modo offline-first.

(5) OE5. Evaluar el impacto del FDT sobre productividad, eficiencia hídrica y resiliencia climática mediante diseño cuasi-experimental pre-post con grupo control emparejado (2029–2030).

## RESULTADOS

Dado el estadio actual de la investigación, los resultados presentados comprenden la arquitectura conceptual del sistema AgroTwin, el protocolo metodológico por ciclos y los indicadores de impacto proyectados, fundamentados en el trabajo previo de prototipado del nodo AgroHub v2.0 y en los datos agroclimáticos exploratorios de campo (2021–2024).

### La arquitectura tripartita de AgroTwin Magdalena

AgroTwin Magdalena adopta la arquitectura tripartita del gemelo digital propuesta por Grieves y Vickers [7] y aplicada al dominio agrícola por Verdouw et al. [8]: entidad física (finca, cultivos, suelo y microclima), entidad digital (modelos computacionales, series de datos y ontologías de dominio) y canal de datos bidireccional (IoT-LoRaWAN, telemetría y retroalimentación). La innovación central reside en la incorporación del KEL como variable ontológica estructurada, codificada a partir del saber ancestral de las comunidades Chimila y Arhuaco e integrada como capa de validación cultural de los datos instrumentales. La plataforma articula tres capas funcionales descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Capas funcionales de la arquitectura AgroTwin Magdalena. Fuente: elaboración propia.

| Capa funcional | Componentes principales | Especificaciones técnicas clave |
|---|---|---|
| I — Percepción IoT (Red AgroHub v2.0) | Nodo AgroHub v2.0 (ESP32) · Red LoRaWAN 16–20 nodos piloto · 1 estación meteorológica automática | Temperatura ±0,2 °C; HR ±2 %; pH; Irradiancia ±5 W/m²; Precipitación \| Alcance: hasta 15 km (LoS) \| Autonomía solar: 72 h \| IP65 \| Resolución: 15 min |
| II — Motor predictivo ML | Modelos LSTM, Random Forest, CNN · Arquitecturas híbridas LSTM-RF · Microservicios REST | nRMSE ≤ 12 %; $R^2$ ≥ 0,80 (regresión) \| Accuracy ≥ 85 %; F1-score ≥ 0,82 (clasificación) \| Validación: k-fold (k=5), partición temporal 70/15/15 |
| III — Ontología KEL-IoT | Conocimiento ecológico local (KEL) · Ontología intercultural estructurada · Capa de validación cultural | Codificación temática de saberes ancestrales \| Integración como variable ontológica en el FDT \| Primer gemelo digital intercultural en literatura de Agricultura 4.0 |

### Diseño metodológico: cuatro ciclos semestrales (2026–2030)

La investigación se estructura bajo una metodología IAP-Living Lab articulada en cuatro ciclos semestrales que involucran la cuádruple hélice: UPV, Universidad del Magdalena, Agrosavia Centro Caribia, Energesis y comunidades ACIFC (co-investigadoras activas). Ciclo 1 (2026-II/2027-I): diagnóstico participativo y caracterización agroecológica en 20 unidades piloto. Ciclo 2 (2027-II/2028-I): despliegue de 16 nodos IoT-LoRaWAN y formación de 6 técnicos comunitarios certificados. Ciclo 3 (2028-II/2029-I): desarrollo iterativo de modelos ML y validación participativa de la plataforma AgroTwin. Ciclo 4 (2029-II/2030-I): evaluación cuasi-experimental del impacto del FDT y publicación de resultados.

**Impacto cuantificado proyectado y brechas científicas abordadas**

Las tres hipótesis de investigación (H1–H3) han sido operacionalizadas con indicadores cuantitativos verificables mediante diseño cuasi-experimental. La Tabla 2 presenta el impacto cuantificado proyectado para el cuarto año de ejecución (2029–2030).

Tabla 2. Indicadores de impacto cuantificado proyectado — Sistema AgroTwin Magdalena. Verificables mediante diseño cuasi-experimental ($p < 0,05$; d de Cohen). Fuente: elaboración propia.

| Variable de impacto | Línea base (sin FDT) | Proyección con FDT |
|---|---|---|
| Precisión predictiva agroclimática (H1) | Modelos ARIMA univariados (referencia) | Mejora ≥ 20 % en nRMSE; $p < 0,05$ |
| Rendimiento productivo (H3) | Grupo control — línea base experimental | Incremento ≥ 15 % respecto al grupo control |
| Pérdidas postcosecha (H3) | 25–40 % en cultivos de pancoger [5] | Reducción ≥ 20 % (diseño cuasi-experimental) |
| Uso de agua de riego | Volumen base sin optimización FDT | Reducción estimada 15–20 % (simulación hídrica LSTM) |
| Aplicación de agroquímicos | Dosis base (sin FDT) | Reducción ≤ 25 % (detección fitosanitaria temprana) |

La revisión sistemática identifica tres brechas científicas: (i) Brecha arquitectónica: ningún FDT ha sido desarrollado para sistemas ACIFC del Caribe colombiano; los existentes fueron concebidos para agricultura intensiva en climas templados [7, 8]. (ii) Brecha de integración IoT-ML-KEL: ningún estudio ha integrado el KEL como variable ontológica estructurada en un gemelo digital, configurando el paradigma inédito del «gemelo digital intercultural» [9, 10]. (iii) Brecha de evaluación de impacto: no existe diseño cuasi-experimental que haya evaluado el impacto de un FDT sobre la productividad y resiliencia climática de comunidades ACIFC en el trópico latinoamericano.

## CONCLUSIONES

AgroHub Magdalena representa un avance científico original en la intersección de la ingeniería de sistemas ciberfísicos, el modelado agroclimático de precisión y la implementación participativa intercultural de tecnologías digitales en el trópico

latinoamericano. Su contribución central —la arquitectura de gemelo digital intercultural que integra IoT-LoRaWAN, modelos ML y conocimiento ecológico local en una ontología unificada— configura un paradigma inédito en la literatura de Agricultura 4.0.

Desde la perspectiva de la pertinencia social y territorial, la investigación conecta con el Derecho Humano a la Alimentación y la Bioeconomía Sostenible (Misiones 1 y 4 de los PIIOM de Minciencias) y con los ODS 2 (Hambre Cero), 9 (Innovación e Infraestructura) y 13 (Acción por el Clima). Los resultados tienen aplicabilidad directa en el Plan Departamental de Extensión Agropecuaria (PDEA) del Magdalena y en el diseño de iniciativas de datos agroclimáticos en zonas PDET del Caribe colombiano.

AgroHub Magdalena demuestra que la Agricultura 4.0 puede ser un proyecto inclusivo para el trópico latinoamericano, capaz de amplificar —y no de sustituir— el conocimiento ecológico acumulado por generaciones de comunidades campesinas e indígenas.

## REFERENCIAS

[1] Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosystems Engineering, 164, 31–48.

[2] Ferrández-Pastor, F. J., García-Chamizo, J. M., Nieto-Hidalgo, M., & Mora-Martínez, J. (2018). Precision agriculture design method using a distributed computing architecture on IoT context. Sensors, 18(6), 1731.

[3] DANE. (2016). Tercer Censo Nacional Agropecuario: Colombia — Hay campo para todos. DANE.

[4] DANE. (2022). Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2022. DANE.

[5] FAO. (2019). El estado de la alimentación y la agricultura: progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. FAO.

[6] Agrosavia. (2021). Resultados de investigación en sistemas de producción de maíz tecnificado en la región Caribe colombiana. Centro de Investigación Caribia.

[7] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems (pp. 85–113). Springer.

[8] Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. Agricultural Systems, 189, 103046.

[9] Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. Sensors, 21(11), 3758.

[10] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming — A review. Agricultural Systems, 153, 69–80.

[11] Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture, 147, 70–90.

[12] CEPAL, FAO, & IICA. (2020). Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas 2019–2020. CEPAL.

# DESARROLLO DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FLUENCIA ASISTIDO POR AGENTES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

**García-Carrasco, Sergio [(1)], Eixerés Tomás, Beatriz[(2)], Cerdà-Leal, Francisco de Paula[(2)], Domingo Arlandis, Víctor[(2)]**

*(1) Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Universitat Politècnica de València, Pza. Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, España, mailto:sergarc9@epsa.upv.es*

*(2) Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), Universitat Politècnica de València, Pza. Ferrándiz y Carbonell 1, 03801, Alcoy, España*

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de una máquina de ensayos de fluencia implementada con un microcontrolador Arduino Uno y asistentes de inteligencia artificial conversacional. El sistema integra sensores de fuerza y desplazamiento, control PID en lazo cerrado tanto de posición como de fuerza, y almacenamiento de datos en tarjeta SD.

El firmware, compuesto por 18 módulos escritos en C++ sobre el framework Arduino, implementa 11 modos de operación que incluyen ensayos de tracción, fluencia y relajación, junto con sistemas de seguridad por límites de recorrido, sobrecarga, detección de calado de motores y detección automática de rotura de probeta.

El desarrollo se realizó de forma iterativa mediante agentes de IA conversacional, partiendo de una especificación en lenguaje natural y refinando el código a lo largo de 6 sesiones de trabajo, sumando aproximadamente 8 horas de trabajo activo con el asistente. Los resultados experimentales muestran un funcionamiento estable.

Palabras clave: fluencia, equipo de ensayos, Arduino, PID, inteligencia artificial.

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos de fluencia (creep) son fundamentales para caracterizar la deformación dependiente del tiempo de materiales sometidos a carga constante, especialmente en polímeros y metales a alta temperatura. Consisten en aplicar una fuerza constante sobre una probeta y registrar su deformación en función del tiempo, obteniendo curvas que permiten determinar el comportamiento viscoelástico.

Las máquinas comerciales para ensayos de fluencia tienen un coste elevado, lo que limita su disponibilidad en entornos docentes y de investigación con recursos reducidos. Paralelamente, los asistentes de inteligencia artificial (IA) conversacional han demostrado su capacidad para generar código técnico a partir de descripciones en lenguaje natural, acelerando significativamente el desarrollo de sistemas embebidos [1].

El objetivo de este trabajo es desarrollar el firmware para una máquina de ensayos de fluencia de bajo coste con Arduino Uno, implementando todos los modos de ensayo mediante control PID en lazo cerrado, y documentar el proceso de desarrollo iterativo asistido por IA.

## SISTEMA EXPERIMENTAL

Mecánicamente, el equipo es simple. Consta de una estructura sobre la cual hay montadas dos mordazas. Una de ellas, la fija, está unida a la estructura con un sensor de fuerza. La otra, la móvil, está montada sobre dos guías lineales y dos husillos actuados mediante motores paso a paso. El sistema se controla mediante un microcontrolador Arduino Uno (ATmega328P) que ejecuta el firmware y se comunica por puerto serie a 115200 baudios con un PC. Dispone de un sensor de desplazamiento por potenciómetro lineal (KTR-50, ADC de 10 bits), una celda de carga de 10 kN con amplificador HX711 (24 bits) y almacenamiento en tarjeta SD por SPI.

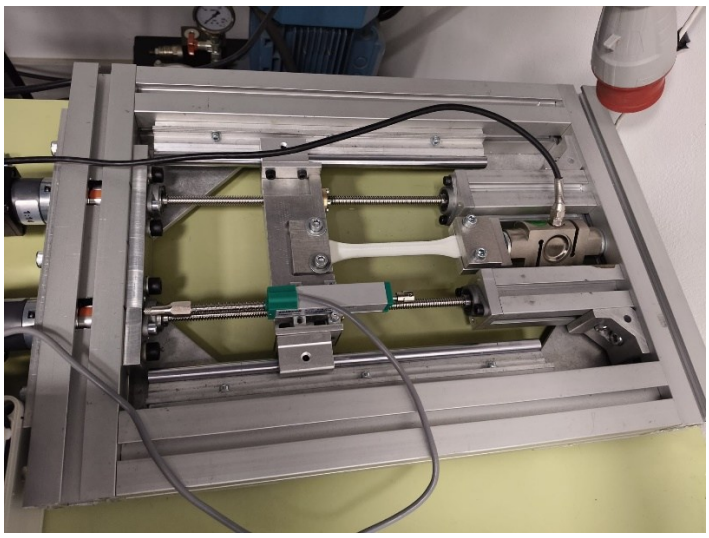


**Figura 1.** Montaje mecánico del equipo de ensayos de fluencia.

El sistema ha de ofrecer cuatro modos de ensayo principales con registro de datos en SD:

(1) Tracción (TENSILE), a velocidad constante hasta límite de seguridad o rotura de probeta;

(2) Fluencia (CREEP), que mantiene una fuerza constante mediante control PID ajustando la velocidad del motor;

(3) Relajación (RELAX), que desplaza la mordaza a una posición fija y registra la caída de fuerza; y

(4) Relajación por fuerza (FORCE_RELAX), similar a la anterior pero con parada determinada por una fuerza objetivo.

Además, incorpora modos auxiliares de posicionamiento como HOLD_ZERO, MOVE_MM, JOG_MM y SEEK_CONTACT, que operan sin registro de datos.

La seguridad del sistema se estructura en cuatro niveles: límites de desplazamiento (rango de -5 mm a 40 mm), límite de fuerza (parada si |fuerza| > 10000 N), detección de calado de los motores (si el desplazamiento comandado supera en más de 1 mm al medido) y detección automática de rotura de probeta.

## DESARROLLO MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

### Metodología

El desarrollo del firmware se realizó mediante un proceso iterativo asistido por un modelo de lenguaje de gran escala [10]. Se proporcionó al asistente una especificación detallada en lenguaje natural (archivo specs.md) y este generó la arquitectura completa del firmware: estructura de directorios, configuración, clases e implementaciones de los 18 módulos. El ciclo de desarrollo fue:

(1) el asistente generaba o modificaba código;

(2) compilación con PlatformIO;

(3) subida a la placa;

(4) pruebas en la máquina real;

(5) comunicación de resultados al asistente;

(6) diagnóstico y corrección.

El documento de especificación specs.md (Figura 1) estaba organizado en cinco secciones.

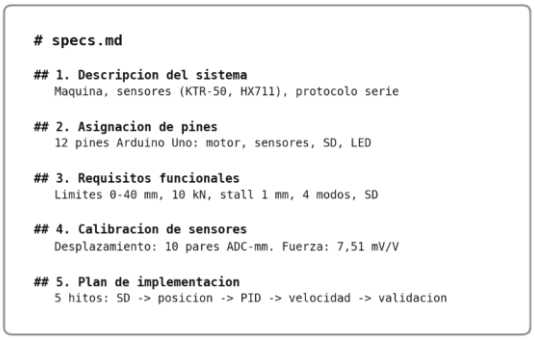
La primera describía la configuración mecánica de la máquina y la estructura de los comandos a los que respondería.

La segunda sección detallaba la asignación de pines del Arduino Uno, que ya se encontraban cableados ya que la máquina funcionaba anteriormente con otro firmware.

La tercera especificaba los requisitos funcionales y de seguridad: límites de posición (0-40 mm) y fuerza (10 kN), detección de calado con tolerancia de 1 mm, y los cuatro modos de ensayo previamente definidos, con registro de datos en la tarjeta SD.

La cuarta sección contenía las tablas de calibración del sensor de posición (10 pares ADC-mm) y del sensor de fuerza (sensibilidad 7,51 mV/V, rango 10 kN).

La quinta sección proponía un plan de implementación en 5 hitos: inicialización de la SD, lectura del sensor de posición, bucles PID, determinación de la velocidad máxima y ensayo de validación final.



```
# specs.md

## 1. Descripcion del sistema
   Maquina, sensores (KTR-50, HX711), protocolo serie

## 2. Asignacion de pines
   12 pines Arduino Uno: motor, sensores, SD, LED

## 3. Requisitos funcionales
   Limites 0-40 mm, 10 kN, stall 1 mm, 4 modos, SD

## 4. Calibracion de sensores
   Desplazamiento: 10 pares ADC-mm. Fuerza: 7,51 mV/V

## 5. Plan de implementacion
   5 hitos: SD -> posicion -> PID -> velocidad -> validacion
```

**Figura 2.** Estructura del documento de especificación specs.md proporcionado al agente de IA.

El proceso se desarrolló a lo largo de 6 sesiones de trabajo con el asistente que sumaron aproximadamente 8 horas de trabajo activo. La Tabla 2 recoge el detalle de cada sesión.

La primera sesión, de 2,4 horas, fue la más intensa y en ella se generó el esqueleto completo del firmware y se realizaron las primeras pruebas de puesta a punto en la máquina real. Las sesiones siguientes, de entre 0,8 y 1,5 horas cada una, se dedicaron a refinar módulos específicos, corregir problemas detectados en la validación experimental y añadir nuevas funcionalidades.

### Ejemplos de correcciones durante el desarrollo

Durante el proceso iterativo, el agente de IA detectó y corrigió una serie de errores de forma autónoma (entre otros):

(1) Falso calado en HOLD_ZERO: al perder contacto mecánico, el sensor leía 0 bits mientras el motor seguía avanzando, activando la detección de calado. Se añadió un decalado de coordenada de +5 mm para que la región de no contacto se detecte como desplazamiento negativo sin necesidad de cambiar físicamente el equipo.

(2) Ajuste del PID de fuerza: el agente de IA detectó oscilaciones en determinados ensayos, por lo que ajustó las ganancias del control PID, llegando a implementar un auto-ajuste dependiendo de la rigidez del material a ensayar.

(3) Detección de rotura: analizando los datos recogidos en ensayos, se identificó el patrón de caída brusca de fuerza. Se implementó un detector que se arma tras 200 N y dispara AL,BK (Alarm, break) si la fuerza cae ≥250 N y ≥50% durante 500 ms.

**Tabla 1.** Sesiones de desarrollo asistido por IA.

| Sesión | Duración | Actividad principal |
|---|---|---|
| 17-abr | 2,4 h | Estructura del firmware, compilación, primera puesta a punto |
| 22-abr | 1,5 h | Tracción, depuración SD, sistema de coordenadas |
| 04-may | 0,8 h | Corrección husillo (2 mm/paso), microstepping |
| 05-may | ~1 h | Calibración HX711, ajuste del PID de fuerza |
| 08-may | ~1,5 h | Detección rotura, jog tuning, auto-ajuste fluencia |
| 13-may | ~1 h | Exportación logs, preparación TFT |

## FIRMWARE RESULTANTE

### Estructura y comunicación

El firmware desarrollado está escrito en C++ sobre PlatformIO con el framework Arduino. Se compone de 18 archivos (9 de cabecera y 9 de implementación) organizados en módulos con responsabilidades bien definidas: Config (constantes y calibración), Types (tipos compartidos), DisplacementSensor, ForceSensor, MotionController, PidController, SafetyManager, CommandParser, DataLogger y MachineController (orquestador de la máquina de estados).

La comunicación con el PC se realiza mediante comandos serie enmarcados entre '<' y '>', formato <COMANDO valor>. El conjunto de comandos incluye STATUS, STOP, ESTOP, TARE, HOLD_ZERO, MOVE_MM, JOG_MM, SEEK_CONTACT, TENSILE, RELAX, FORCE_RELAX y CREEP, además de comandos de ajuste de velocidad, aceleración y ganancias PID.

### Control PID

El sistema implementa dos controladores PID (posición y fuerza) que operan sobre la velocidad objetivo del motor, ejecutada mediante un generador de onda cuadrada basado en Timer1 con aceleración configurable. La banda muerta de posición es de

0,06 mm. El control de fuerza incorpora una tolerancia de ±3 N para evitar micro-ajustes y un auto-ajuste de rigidez que selecciona Kp según la rigidez estimada de la probeta: Kp = 0,005 (≥250 N/mm), 0,008 (≥120 N/mm) o 0,010 (probetas blandas).

**Sistema de seguridad**

La seguridad se implementa mediante cuatro niveles: (1) Límite de desplazamiento: rango de -5 mm a 43 mm con tolerancia de 5 bits en el ADC. (2) Límite de fuerza: parada si |fuerza| > 10000 N. (3) Detección de stall: si el desplazamiento comandado supera en más de 1 mm al medido en un recorrido de 1 mm, se activa la emergencia. (4) Detección de rotura: se arma tras un pico de 200 N y dispara si la fuerza cae ≥250 N y ≥50% respecto al pico durante 500 ms, tras los primeros 3 s del ensayo.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez escrito y cargado el firmware, se realiza una serie de ensayos para validar el funcionamiento de la máquina. Prima, especialmente, validar la estabilidad mecánica de esta, y el funcionamiento correcto de los sistemas de seguridad y detección de rotura.

Las probetas empleadas provienen de descartes, están compuestas en su mayoría de PETG o PA6 con una sección de 4x10 mm.

En la Tabla 1 se resumen los principales ensayos realizados durante la validación del sistema.

**Tabla 2.** Resumen de ensayos realizados durante la validación del sistema.

| Fichero | Tipo | Consigna | Duración | Resultado |
|---|---|---|---|---|
| 25338.ASC | Tracción | 5 mm/min | 55 s | Rotura detectada (1057 N) |
| 33914.ASC | Fluencia | 500 N | 163 s | Estable ±3 N |
| 32052.ASC | Relajación (F) | 200 N | 45 s | Transición FRH correcta |
| 25940.ASC | Fluencia | 500 N | 44 s | Auto-ajuste Kp=0,005 |
| 21365.ASC | Fluencia | 500 N | 95 s | Validación 2ª probeta |
| 15027.ASC | Tracción | 5 mm/min | 24 s | Falso calado (corregido) |

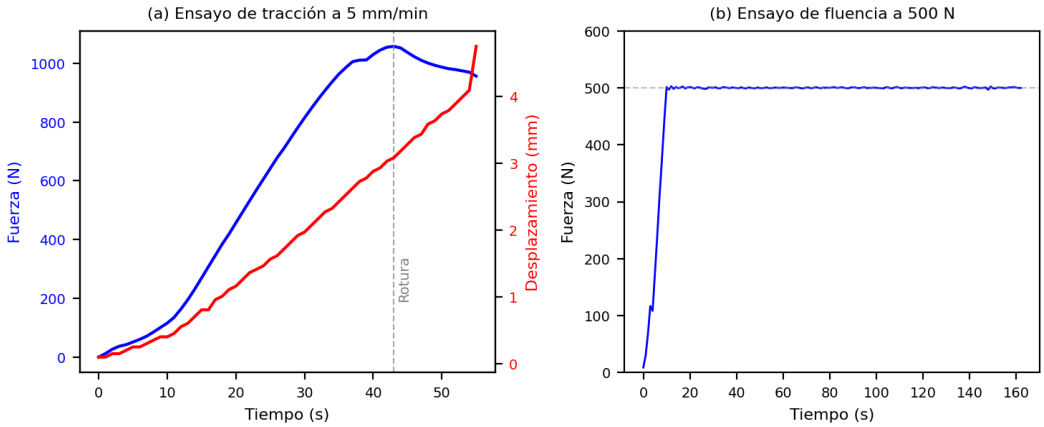



**Figura 3.** Curvas experimentales: (a) ensayo de tracción a 5 mm/min con detección automática de rotura; (b) ensayo de fluencia a 500 N.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado el desarrollo de una máquina de ensayos de fluencia basada en Arduino Uno con control PID en lazo cerrado, registro SD y múltiples niveles de seguridad. El sistema se validó experimentalmente con varias pruebas.

El uso de IA conversacional para el desarrollo del firmware demostró ser eficaz, generando 18 módulos en C++ a partir de una especificación en lenguaje natural, con corrección iterativa de errores basada en la observación del hardware real.

Como trabajo futuro se plantea la integración de métodos similares empleando modelos locales menos potentes, con la ayuda de una serie de instrucciones lógicas para ahorrar recursos computacionales. [9]

## REFERENCIAS

[1] Chen, M. et al. "Evaluating Large Language Models in Embedded System Code Generation." arXiv preprint arXiv:2403.05789, 2024.

[2] Arduino. "Arduino Uno Rev3 Documentation." https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3, 2026.

[3] AVIA Semiconductor. "HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter Datasheet." 2015.

[4] Bogdan, S. "HX711 Arduino Library." https://github.com/bogde/HX711, 2024.

[5] ASTM D2990-17. "Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics." ASTM International, 2017.

[6] ISO 899-1:2017. "Plastics — Determination of creep behaviour — Part 1: Tensile creep." International Organization for Standardization, 2017.

[7] PlatformIO. "Professional Embedded Development Platform." https://platformio.org, 2026.

[8] Brown, T. et al. "Language Models are Few-Shot Learners." In NeurIPS 2020.

[9] García-Carrasco, J., García-Carrasco, S., Maté, A., & Trujillo, J. "Closed-loop evaluation of LLM agents for embedded software development." Manuscrito enviado para publicación. Journal of Systems Architecture, 2026.

[10] OpenAI. (2026). ChatGPT (Versión GPT-5.5) [Modelo de lenguaje]. https://chatgpt.com

# Diseño experimental para la identificación de variables críticas de tejidos y la calidad de fibras de algodón recicladas

**Otero-Camaño, Sabela[(1)], Fabra-Regalado, Marta[(1)], Jordán-Núñez, Jorge[(2)], Micó-Vicent, Bàrbara[(2)] López-Rodriguez, Daniel[(3)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46021, Valencia, mfabreg@doctor.upv.es, sotecam@doctor.upv.es*

*(2) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), jorjornu@upv.es, barmivi@upv.es*

*(3) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, Alcoi, (Alicante), dalorod@upv.es*

## RESUMEN

La industria textil genera millones de toneladas de residuos cada año, siendo el algodón uno de los materiales más críticos por su elevado consumo de agua y pesticidas. Este trabajo presenta la metodología aplicada en un proyecto de reciclaje mecánico de tejidos de origen preconsumo, analizando cómo las características del tejido y del hilo que conforman el mismo, influyen en la calidad de la fibra reciclada obtenida de estos. Se evaluaron variables físicas como gramaje, densidad, título y torsión, además del factor de cobertura como indicador integrador. La calidad de la fibra se evalúa mediante indicadores de la distribución de longitudes como son UQML o SFC, el grado de apertura del material y la cantidad de neps. Los resultados permitirán establecer criterios técnicos de cara a la optimización del proceso de reciclaje con el objetivo de mejorar la calidad de la fibra de algodón reciclado para incrementar su reincorporación al proceso productivo y avanzar hacia prácticas sostenibles.

**Palabras clave:** reciclaje mecánico, algodón, tipo de residuo, tipo de tejido, caracterización, sostenibilidad, calidad de fibra.

## INTRODUCCIÓN

La industria textil es responsable de un impacto ambiental significativo, generando más de 16 millones de toneladas de residuos anuales en la Unión Europea. El algodón, que representa más del 25% de la producción de fibras textiles, requiere aproximadamente 2700 litros de agua por kilogramo producido [1]. Ante esta problemática, el reciclaje mecánico se plantea como una alternativa sostenible para reducir la huella ecológica.

Este estudio se centra en la investigación de residuos preconsumo, desperdicio generado en la mesa de corte para la fabricación de prendas. Dicha metodología se centra en el estudio de los atributos de los tejidos que forman parte de dichos residuos de cara a identificar que propiedades principales que influyen en mayor medida en la calidad de la fibra reciclada. La metodología propuesta busca establecer relaciones entre las características de los tejidos alimentados al inicio del proceso y los parámetros resultantes de calidad de la fibra obtenida tras el proceso de reciclaje mecánico.

## OBJETIVOS

La identificación de parámetros críticos del tejido es esencial para comprender cómo las características estructurales y físicas de los tejidos procedentes de residuos influyen en la calidad de las fibras recicladas de algodón. La metodología propuesta se organiza en fases secuenciales que permiten un análisis sistemático y reproducible.

- Determinar las variables críticas de tejido que definen la calidad de la fibra de algodón reciclada obtenida mediante procesos de reciclaje mecánico, considerando tanto parámetros físicos del tejido como atributos cualitativos que influyen en su comportamiento:
- Desarrollar un proceso de muestreo: establecer un protocolo sistemático para la recolección y preparación de muestras representativas.
- Establecer las pautas para la medición y evaluación de los distintos atributos de tejido e hilos utilizados para su fabricación como; gramaje, densidad, título del hilo, torsión y factor de cobertura.
- Determinar correlaciones entre las variables cualitativas y cuantitativas y propiedades físicas de la fibra reciclada, considerando indicadores de calidad de fibra; los parámetros de distribución de longitudes de fibra, UQML, SFC o UI, contenido de neps y grado de apertura de la materia.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental propuesto se organiza en fases secuenciales que permiten identificar las variables críticas del tejido y su relación con la calidad de la fibra de algodón reciclada. La metodología para la caracterización de los residuos textiles procesado, integra tanto parámetros cualitativos como cuantitativos, asegurando un análisis sistemático y reproducible.

### Muestreo

El proceso de muestreo constituye la primera fase del diseño experimental y tiene como finalidad garantizar que las muestras seleccionadas sean representativas del contenido de cada bala de residuo disponible para su procesamiento mediante reciclaje mecánico a escala industrial. Para ello, se establecen criterios de identificación y registro que permiten asegurar la trazabilidad y la calidad del análisis posterior.

- Evaluación inicial de la bala: se examina el contenido de la bala e identifican los distintos tipos de tejidos presentes en cada una, identificando variaciones en tipología de ligamento, gramaje, densidad, título del hilo, etc.
- Recolección de muestras: se extraen fragmentos de cada tipo de tejido identificado dentro de la bala, asegurando que la selección sea representativa del contenido de esta.
- Registro de información asociada: cada muestra marca y se documenta con datos específicos que permiten su correcta trazabilidad:
    - Identificador único de la bala y su peso total
    - Marcado de muestras mediante código alfabético asignado acompañado de marcado físico para evitar confusiones

- Registro de las muestras extraídas en cada caso y la proporción en la que están presentes en la bala en cuestión, indicando un porcentaje estimado.

Este procedimiento sistemático asegura que las muestras recolectadas reflejen de manera fiel la heterogeneidad de los residuos textiles disponibles a escala industrial. La información registrada posibilita la trazabilidad de las muestras para asegurar un análisis más detallado y exhaustivo, facilitando la caracterización de los materiales que son procesados mediante reciclaje mecánico a escala industrial.

**Caracterización de tejidos**

La caracterización de los tejidos constituye una etapa fundamental dentro del diseño experimental, ya que permite identificar y medir las propiedades que se desean evaluar como factores que influyen directamente en la calidad de la fibra reciclada. Para ello, se consideran tanto parámetros cualitativos como parámetros cuantitativos, lo que asegura un análisis integral y comparativo entre diferentes lotes de material.

Por lo tanto, los parámetros definidos para su análisis se indican a continuación en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Parámetros cualitativos y cuantitativos definidos

| Parámetros cualitativos | Parámetros cuantitativos |
|---|---|
| Punto de recogida del residuo | Gramaje |
| Color de la materia | Densidad |
| Tipo de tejido | Factor de cobertura |
| Tipo de ligamento | Número de cabos |
| Tipo de hilatura | Título de hilo (Ne) |
| | Torsión |

**Parámetros cualitativos**

Los parámetros cualitativos permiten clasificar y describir atributos del tejido que no se expresan en valores numéricos, pero que condicionan el comportamiento del material en el proceso de reciclaje. Entre ellos se incluyen:

- Punto de recogida del residuo: clasificación de la materia según el punto de recogida del residuo en cuestión, siendo los más comunes; preconsumo, procedente de restos de tejido desechados durante el corte de prendas o postconsumo, siendo residuos procedentes de prendas ya utilizadas y desechadas al finalizar su ciclo de uso.
- Color del tejido: clasificación según criterio interno definido por una carta de color física para la correcta identificación y preparación del material. Los colores más abundantes en el mercado suelen ser, natural, blanco, crudo, índigo, los cuales puede influir en la calidad de la fibra reciclada final.
- Tejido: identificación del proceso realizado para la elaboración del tejido, siendo los más comunes tejidos de calada o de punto por trama.
- Ligamento: identificación de la estructura de tejido como pueden ser, punto simple, jersey, punto elástico o piqué como ejemplos de tejidos de punto por trama, y sarga, tafeta son algunos de los tipos de tejido de calada más utilizados, y sus características pueden afectar a la facilidad de disgregación mecánica de los mismos durante el proceso de reciclaje.
- Hilatura: corresponde a la tecnología utilizada para la fabricación de los hilos que conforman el tejido, siendo un parámetro relevante en la caracterización del material. La identificación del sistema de hilatura permite comprender las propiedades

mecánicas y funcionales del hilo, para poder determinar su comportamiento durante el proceso de reciclaje. identificación de la tecnología utilizada para la fabricación de los hilos que componen el tejido, siendo los más comunes; hilatura de anillos o hilatura de rotor.

- Hilatura de anillos (Ring Spinning): método tradicional que produce hilos de alta resistencia y uniformidad, ampliamente utilizado en tejidos de punto y planos.
- Hilatura de rotor (Open-End Spinning): tecnología más reciente que permite una producción rápida y económica, generando hilos con menor resistencia, pero adecuados para aplicaciones específicas.

La correcta identificación de los parámetros cualitativos permite establecer categorías de análisis y facilitan la interpretación de los resultados en función de la diversidad de los residuos textiles.

**Parámetros cuantitativos**

Los parámetros cuantitativos en la caracterización de tejidos se miden siguiendo normas internacionales UNE-EN ISO, que aseguran la reproducibilidad y comparabilidad de resultados en la industria textil. Estas normas definen métodos de ensayo para cada uno de los parámetros definidos:

- Gramaje (g/m²): peso del tejido por unidad de superficie
  Norma aplicable: ISO 3801:1977 / UNE-EN 12127– Textiles. Determinación de la masa por unidad de área de tejidos [2].

- Densidad (mallas/cm²): número de hilos o mallas por unidad de longitud en urdimbre y trama.
  Norma aplicable: ISO 7211-2:1984 / UNE-EN 1049-2 – Textiles. Tejidos. Análisis de la construcción. Parte 2: Determinación del número de hilos por unidad de longitud [3].

- Factor de cobertura: parámetro integrador que relaciona gramaje y densidad para expresar el grado de cobertura del tejido.
  Norma aplicable: no existe norma ISO específica; se calcula a partir de los valores obtenidos en gramaje y densidad siguiendo metodologías de ingeniería textil.

- Número de cabos: cantidad de filamentos o hebras que conforman el hilo.

- Título de hilo (Tex): masa por unidad de longitud del hilo (ej. tex = g/km).
  Norma aplicable: ISO 2060:1994 / UNE-EN ISO 2060 – Textiles. Hilos. Determinación de la densidad lineal (título) en sistemas de numeración directa [4].

- Torsión (vueltas/m): número de giros por unidad de longitud en el hilo.
  Norma aplicable: ISO 2061:2015 / UNE-EN ISO 2061 – Textiles. Determinación de la torsión de los hilos. Método de conteo directo [5].

La caracterización de los tejidos, mediante la integración de parámetros cualitativos y cuantitativos, constituye una etapa esencial para comprender la influencia de las propiedades estructurales y físicas de los residuos en la calidad de la fibra reciclada. Los parámetros cualitativos; como el color, el tipo de tejido, el ligamento y la tecnología de hilatura, permiten establecer categorías de análisis que reflejan la diversidad de los residuos textiles. Por su parte, los parámetros cuantitativos; gramaje, densidad, factor de cobertura, número de cabos, título de hilo y torsión, aportan medidas objetivas que,

respaldadas por normas internacionales, garantizan la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados.

En conjunto, este enfoque dual proporciona una base sólida para el análisis estadístico y la identificación de variables críticas, asegurando que el proceso de reciclaje mecánico se fundamente en criterios técnicos rigurosos y aplicables a escala industrial.

**Parametrización del proceso de reciclaje mecánico**

La parametrización del proceso de reciclaje mecánico se establece con el fin de garantizar la reproducibilidad y la eficiencia en la obtención de fibras recicladas. Se definen variables de control en cada etapa, que permiten estandarizar el procedimiento y evaluar su impacto en la calidad final de la fibra resultante.

El trinchado mecánico constituye la fase central del proceso de reciclaje de residuos textiles, ya que permite la disgregación física de los tejidos en fibras individuales. Durante esta etapa, el material previamente cortado y humectado se somete a la acción rodillos que ejercen fuerzas de arrastre, fricción y apertura. El objetivo es reducir la estructura compacta del tejido hasta obtener fibras sueltas con un grado de apertura adecuado para su posterior reutilización en procesos de hilatura.

La parametrización del proceso de trinchado se define por los siguientes factores:

- Configuración de máquina, número, tipología y características de rodillos
- Velocidad de alimentación
- Velocidad de rodillo
- Grado de apertura
- Grado de purga

Estos parámetros combinados con las características de los tejidos procesados determinan directamente la calidad de la fibra en cuanto a longitud de fibra obtenida, generación de neps y grado de apertura resultante. En consecuencia, el control riguroso de esta etapa asegura que la fibra reciclada cumpla con los estándares de calidad requeridos para su reincorporación en la cadena productiva.

**Evaluación de la calidad de fibra**

La calidad de la fibra reciclada se determina mediante parámetros físicos que permiten establecer criterios objetivos de comparación entre lotes. Estos parámetros se miden siguiendo normas internacionales y metodologías de ingeniería textil:

- Distribución de longitudes: definida por varios parámetros; UQML medida de la longitud efectiva de la fibra, que influye en la resistencia y uniformidad del hilo.
- Contenido de neps: cuantificación de las imperfecciones o aglomerados de fibras, indicador de enmarañamiento y apertura.
- Grado de apertura: nivel de individualización de fibras alcanzado en el proceso de reciclaje mecánico, relacionado con la eficiencia del trinchado.

## RESULTADOS

Dado que este trabajo es metodológico, los resultados obtenidos proporcionarán la información necesaria para la realización de análisis orientadas a evidenciar la posible influencia de los parámetros cualitativos y cuantitativos del tejido en la calidad de la fibra reciclada. El objetivo es identificar cuáles son los factores determinantes, como el tipo

de tejido, el ligamento y la tecnología de hilatura, que condicionan la eficiencia del trinchado mecánico definido por el grado de apertura de las fibras y la calidad de la fibra.

Asimismo, se pretende identificar si existen correlaciones entre los parámetros cuantitativos definidos que sean significativas con los parámetros que definen la longitud de fibra, el número de neps, de cara a confirmar su papel como variables críticas en el proceso. El análisis estadístico mediante PCA permitirá identificar agrupaciones de muestras y establecer relaciones claras entre las propiedades iniciales del tejido y el desempeño del reciclaje, aportando una base sólida para la optimización del proceso a escala industrial.

## CONCLUSIONES

El diseño experimental propuesto contempla de manera conjunta el análisis de parámetros cualitativos: color, tipo de tejido, ligamento, tecnología de hilatura, homogeneidad de lote y parámetros cuantitativos: gramaje, densidad, factor de cobertura, número de cabos, título de hilo, torsión, con el fin de caracterizar de forma integral los residuos textiles disponibles para su procesamiento a nivel industrial. Esta doble aproximación metodológica permite establecer un marco sólido para la aplicación de herramientas estadísticas, como el Análisis de Componentes Principales, que facilitarán la identificación de patrones y la clasificación de lotes en fases posteriores del estudio.

El objetivo principal de esta propuesta es ayudar a definir el marco metodológico de cara a aportar resultados empíricos, así como definir una metodología reproducible que sirva de base para investigaciones futuras y que ayude a identificar los factores críticos de los que depende la calidad de fibra resultante del proceso de reciclaje a escala industrial. Esta información es crucial de cara a optimizar y definir criterios de selección de residuos textiles basados en la caracterización integral de variables cualitativas y cuantitativas que repercuten en el proceso de reciclaje mecánico a nivel industrial.

## REFERENCIAS

[1] Ellen MacArthur Foundation (2017). "A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future". https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy

[2] International Organization for Standardization (1977). "ISO 3801: Textiles — Woven fabrics — Determination of mass per unit area". Geneva: ISO. https://www.iso.org/standard/9291.html

[3] Asociación Española de Normalización (2000). "UNE-EN 1049-2: Textiles — Tejidos — Análisis de la construcción — Parte 2: Determinación del número de hilos por unidad de longitud". Madrid: AENOR. https://www.une.org/encuentra-tu-norma/norma/?c=N0020129

[4] International Organization for Standardization (1994). "ISO 2060: Textiles — Yarns from packages — Determination of linear density (mass per unit length) and yarn count". Geneva: ISO. https://www.iso.org/standard/6959.html

[5] International Organization for Standardization (2015). "ISO 2061: Textiles — Yarns — Determination of twist". Geneva: ISO. https://www.iso.org/standard/61053.html

# Paralelismo e inteligencia artificial: acelerando el análisis de señales temporales

**Seguí Moreno, Juan[(1)], Molina Picó, Antonio [(2)], Waqas, Ali [(3)]**
*(1) Dpto. de Informática de Sistemas y Computadores, Universitat Politècnica de València, e-mail: juansegui@upv.es.*
*(2) Dpto. de Informática de Sistemas y Computadores, Universitat Politècnica de València, e-mail: antoniomolina@disca.upv.es*
*(2) Dpto. de Informática de Sistemas y Computadores, Universitat Politècnica de València, e-mail: wali2@doctor.upv.es*

## RESUMEN

Slope Entropy (SlEn) es un algoritmo de estimación de complejidad para series temporales con un coste computacional de orden O(N·m) que puede resultar prohibitivo en aplicaciones biomédicas en tiempo real. Este trabajo presenta una implementación paralela de SlEn basada en instrucciones SIMD AVX-512, una técnica de vectorización ampliamente adoptada en el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial. La implementación se evalúa frente a la versión secuencial de referencia sobre señales sintéticas de distintos tamaños. Se obtienen aceleraciones de hasta 8,0x para diez millones de muestras, aproximando el límite teórico del conjunto de instrucciones, sin requerir hardware especializado.

**Palabras clave:** paralelismo, SIMD, AVX-512, Slope Entropy, series temporales, señales biomédicas, transformers, aceleración computacional, Inteligencia Artificial.

## INTRODUCCIÓN

### El rol del paralelismo en la inteligencia artificial moderna

El rendimiento de los sistemas de inteligencia artificial modernos descansa en buena medida sobre el paralelismo computacional. LeCun, Bengio e Hinton ya señalaron que el aprendizaje profundo no fue viable a gran escala hasta que se dispuso de hardware capaz de ejecutar las operaciones de múltiples capas de forma concurrente [1].

La arquitectura transformadora, introducida por Vaswani et al. en 2017, llevó este paradigma al extremo [2]. Un transformer procesa secuencias enteras de forma simultánea mediante mecanismos de atención que computan las relaciones entre todos los elementos de la entrada al mismo tiempo. Esto lo hace inherentemente paralelo: cada cabeza de atención opera de forma independiente y sus cálculos pueden distribuirse entre múltiples unidades de procesamiento sin dependencias entre ellas. Modelos como BERT [3] y sus sucesores han explotado esta paralelización para alcanzar un rendimiento sin precedentes en tareas de lenguaje natural.

Entrenar estos modelos a escala industrial exige un nivel de paralelismo que va más allá de una sola GPU. Shoeybi et al. describieron en Megatron-LM cómo entrenar modelos de hasta 8.300 millones de parámetros distribuyendo el cálculo entre 512 GPUs, alcanzando 15,1 PetaFLOPs sostenidos [4]. Este tipo de infraestructura ilustra hasta qué punto la escalabilidad del paralelismo es un requisito de diseño, no una optimización opcional, en los sistemas de IA actuales.

### Tipos de paralelismo utilizados en IA

Las principales estrategias de paralelismo adoptadas por la IA son tres. La primera es el paralelismo de datos, en el que el mismo modelo se replica en varias GPUs y cada una procesa un subconjunto diferente de los datos de entrenamiento. La segunda es el paralelismo de modelo, en el que el propio modelo se divide entre varios procesadores cuando es demasiado grande para caber en la memoria de uno solo [4]. La tercera es el paralelismo a nivel de instrucción mediante SIMD (Single Instruction, Multiple Data), que permite a una CPU aplicar la misma operación a múltiples datos en un solo ciclo de reloj. Es la estrategia más accesible de las tres, ya que no requiere hardware adicional ni distribución en red.

Las instrucciones AVX-512, la variante más avanzada de Intel, utilizan registros de 512 bits que permiten procesar 8 números de doble precisión en paralelo en cada operación [5,6]. Este tipo de aceleración no requiere hardware adicional y está disponible en cualquier CPU moderna de servidor o escritorio. Los compiladores modernos son capaces además de detectar bucles susceptibles de vectorizarse y generar estas instrucciones de forma automática [7]. Estudios recientes han demostrado aceleraciones de entre 4x y 8x al aplicar AVX en algoritmos de optimización y cálculo científico [8,9].

**La misma necesidad en el análisis de series temporales**

Los algoritmos de análisis de series temporales presentan, desde el punto de vista computacional, una estructura similar a la de muchas operaciones de IA: operaciones repetitivas sobre ventanas o segmentos de datos, sin dependencias entre iteraciones. En el contexto biomédico, señales como el electrocardiograma (ECG) o el electroencefalograma (EEG) deben analizarse con rapidez para permitir aplicaciones clínicas en tiempo real [10]. Los algoritmos de entropía, que cuantifican la complejidad e irregularidad de una señal, son herramientas valiosas para este fin, pero su coste computacional puede ser un factor limitante [11,12].

Entre estos algoritmos, Slope Entropy (SlEn) es una medida de complejidad propuesta por Cuesta-Frau [13] que combina información ordinal y de amplitud calculando los patrones de pendiente entre muestras consecutivas de la señal. Su mayor poder discriminante frente a Permutation Entropy [14] o Sample Entropy [12] la ha hecho de interés creciente en aplicaciones biomédicas [15,16]. Sin embargo, su complejidad $O(N \cdot m)$ la hace computacionalmente costosa para señales largas o procesamiento en tiempo real, lo que motiva directamente la optimización que se presenta en este trabajo.

La estructura interna de SlEn es favorable para la vectorización: las comparaciones entre muestras son independientes entre sí, los patrones se calculan sobre ventanas solapadas sin dependencias entre iteraciones, y las clasificaciones por umbral de pendiente se traducen directamente en operaciones de comparación vectorial. Estas mismas propiedades son las que permiten vectorizar eficientemente los kernels de atención en los modelos de IA actuales [2].

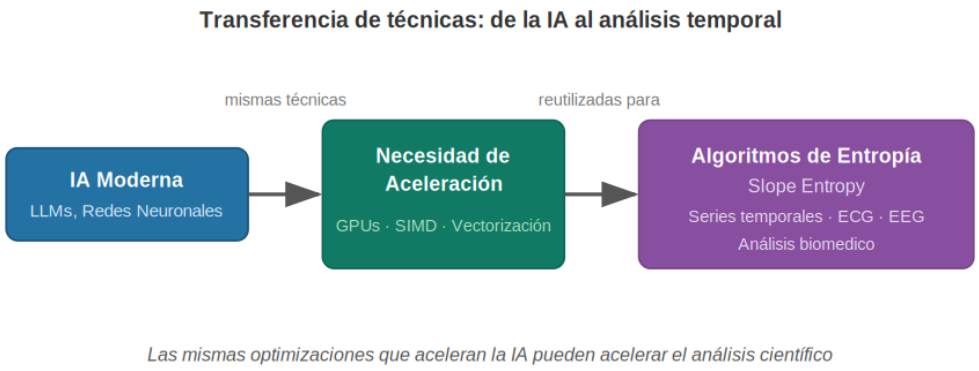



**Figura 1.** Relación conceptual entre las técnicas de paralelismo de la IA moderna y su aplicación al análisis de señales temporales.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es reducir el tiempo de cálculo del algoritmo Slope Entropy mediante vectorización SIMD, evaluando en qué condiciones esta técnica, ampliamente utilizada en la aceleración de sistemas de inteligencia artificial, resulta eficaz para el procesamiento de señales temporales. De este objetivo se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Implementar una versión de referencia secuencial del algoritmo Slope Entropy sobre CPU.
- Diseñar e implementar una versión paralela del mismo algoritmo usando instrucciones AVX-512.
- Comparar el rendimiento de ambas implementaciones en función del tamaño de la señal.
- Cuantificar el speedup e identificar a partir de qué volumen de datos el paralelismo resulta rentable.
- Discutir las implicaciones para el procesamiento de señales biomédicas en tiempo real.

## RESULTADOS

### Configuración experimental

Se implementaron dos versiones de Slope Entropy con parámetro m=3 sobre señales sintéticas de ruido gaussiano en cinco tamaños distintos. La Tabla 1 recoge los detalles del entorno utilizado.

**Tabla 1.** Configuración del entorno experimental.

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| **CPU** | Intel Core i7 con soporte AVX-512 |
| **Compilador** | GCC 13.2, opciones: -O3 -march=native -mavx512f |
| **Parámetro m** | 3 (dimensión de inmersión) |

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| **Tamaños de señal** | 1.000 / 10.000 / 100.000 / 1.000.000 / 10.000.000 muestras |
| **Implementaciones** | Secuencial (C estándar) frente a SIMD (AVX-512) |
| **Métricas** | Tiempo de ejecución (ms) y speedup |

### Implementaciones

La versión secuencial sigue el algoritmo original en C estándar: para cada ventana de tamaño m calcula las diferencias entre muestras consecutivas y las clasifica según umbrales de pendiente. El proceso es puramente iterativo y no aprovecha ningún mecanismo de paralelismo del procesador.

La versión paralela reorganiza el bucle principal para procesar 8 ventanas simultáneamente mediante registros AVX-512 de 512 bits [5,6]. Las comparaciones de pendiente entre muestras se ejecutan con instrucciones de comparación vectorial, y la clasificación por umbrales se realiza mediante operaciones de máscara. El resultado numérico es idéntico al de la versión secuencial. Este enfoque de vectorización por bloques es el mismo que emplean los kernels de álgebra lineal densa en los que se apoya el entrenamiento de redes neuronales [6,9].

### Tiempos de ejecución y speedup

La Tabla 2 muestra los tiempos medidos y el speedup obtenido para cada tamaño de señal.

**Tabla 2.** Tiempos de ejecución (ms) y speedup para cada tamaño de señal.

| Tamaño (N) | Secuencial (ms) | SIMD (ms) | Speedup |
|---|---|---|---|
| 1.000 | 0,0152 | 0,0073 | **2,1x** |
| 10.000 | 0,1526 | 0,0355 | **4,3x** |
| 100.000 | 1,4758 | 0,2170 | **6,8x** |
| 1.000.000 | 14,9588 | 1,8935 | **7,9x** |
| 10.000.000 | 149,596 | 18,700 | **8,0x** |

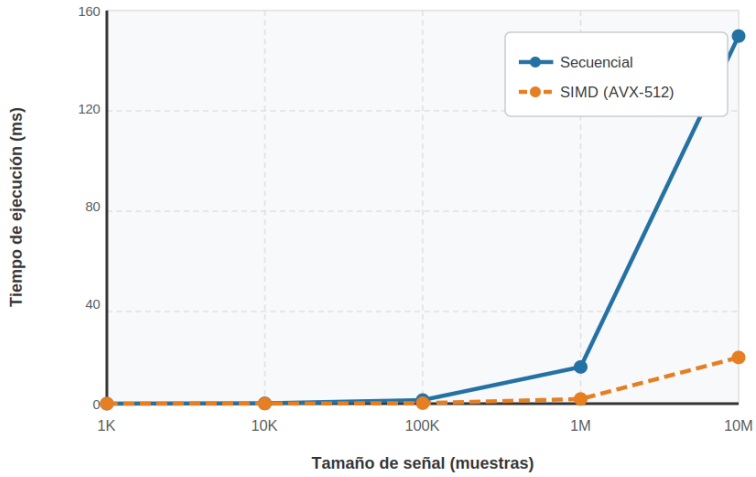



**Figura 2.** Tiempo de ejecución (ms) en función del tamaño de la señal para las dos implementaciones.

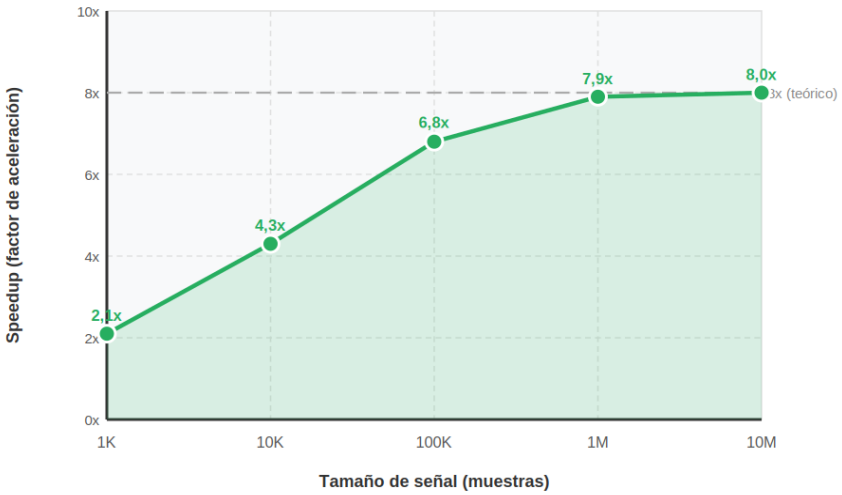



**Figura 3.** Factor de aceleración (speedup) de la implementación SIMD respecto a la secuencial.

Para N=1.000 el speedup es de 2,1x: el sobrecoste de carga y alineación de los registros vectoriales no se amortiza con un volumen de datos tan reducido. A partir de N=100.000 el factor supera 6x, y alcanza 8,0x para N=10.000.000, valor que coincide con el límite teórico de AVX-512 para operaciones sobre números de doble precisión (8 elementos por registro). La estabilización del speedup a partir de ese punto indica que el cuello de botella ha migrado del cómputo al ancho de banda de memoria, comportamiento documentado en otros trabajos de vectorización intensiva [8,9].

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la vectorización SIMD mediante instrucciones AVX-512 reduce de forma sustancial el tiempo de cálculo de Slope Entropy. La razón es estructural: el algoritmo opera con comparaciones independientes sobre ventanas solapadas, sin dependencias entre iteraciones, lo que permite aprovechar directamente la capacidad de procesamiento vectorial de cualquier CPU moderna, sin necesidad de modificar la lógica del cálculo.

Mediante instrucciones AVX-512 SIMD se han obtenido aceleraciones de hasta 7,9x sin requerir hardware especializado. Este resultado reduce el tiempo de cálculo de aproximadamente 15 ms a menos de 2 ms para señales de un millón de muestras, lo que abre la posibilidad de integrar SIEn en sistemas de monitorización biomédica con restricciones de latencia [10]. La ventaja es especialmente relevante en dispositivos portátiles y sistemas de edge computing, donde las instrucciones AVX o NEON están disponibles pero la GPU no lo está [6].

La metodología es generalizable a otros algoritmos de entropía con estructuras similares, como Sample Entropy [12] o Permutation Entropy [14]. El volumen creciente de aplicaciones clínicas de Slope Entropy [15,16] refuerza el interés práctico de su optimización. Que una CPU convencional con instrucciones AVX-512 sea suficiente para obtener estos resultados es, en sí mismo, el argumento central: no se necesita infraestructura de gran escala para aplicar las mismas estrategias de paralelismo que impulsan la IA moderna.

## REFERENCIAS


[1] LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G. (2015). "Deep learning". *Nature,* v. 521, pp. 436-444. http://dx.doi.org/10.1038/nature14539

[2] Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J.; Jones, L.; Gomez, A.N.; Kaiser, L.; Polosukhin, I. (2017). "Attention is all you need". *Advances in Neural Information Processing Systems,* v. 30, pp. 5998-6008.

[3] Devlin, J.; Chang, M.W.; Lee, K.; Toutanova, K. (2019). "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding". *Proceedings of NAACL-HLT 2019,* pp. 4171-4186. http://dx.doi.org/10.18653/v1/N19-1423

[4] Shoeybi, M.; Patwary, M.; Puri, R.; LeGresley, P.; Casper, J.; Catanzaro, B. (2019). "Megatron-LM: Training Multi-Billion Parameter Language Models Using Model Parallelism". arXiv:1909.08053. https://arxiv.org/abs/1909.08053

[5] Intel Corporation (2023). "Intel Intrinsics Guide: AVX-512 Instructions". https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/

[6] Bramas, B.; Kus, P. (2018). "Computing the sparse matrix vector product using block-based kernels without zero padding on processors with AVX-512 instructions". *PeerJ Computer Science.* http://dx.doi.org/10.7717/peerj-cs.151

[7] Cooper, K.D.; Torczon, L. (2011). "Engineering a Compiler". San Francisco: Morgan Kaufmann. 2a ed. ISBN: 978 0120884780

[8] Safarik, J.; Snasel, V. (2023). "Acceleration of Particle Swarm Optimization with AVX Instructions". *Applied Sciences,* v. 13, n. 2, 734. http://dx.doi.org/10.3390/app13020734

[9] Watanabe, H.; Nakagawa, K.M. (2019). "SIMD vectorization for the Lennard-Jones potential with AVX2 and AVX-512 instructions". *Computer Physics Communications,* v. 237, pp. 1-7. http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2018.10.028

[10] Goldberger, A.L.; Amaral, L.A.N.; Glass, L.; Hausdorff, J.M.; Ivanov, P.C.; Mark, R.G.; Mietus, J.E.; Moody, G.B.; Peng, C.K.; Stanley, H.E. (2000). "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals". *Circulation,* v. 101, n. 23, pp. e215-e220.

[11] Pincus, S.M. (1991). "Approximate entropy as a measure of system complexity". *Proceedings of the National Academy of Sciences,* v. 88, n. 6, pp. 2297-2301.

[12] Richman, J.S.; Moorman, J.R. (2000). "Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy". *American Journal of Physiology,* v. 278, n. 6, pp. H2039-H2049.

[13] Cuesta-Frau, D. (2019). "Slope Entropy: A New Time Series Complexity Estimator Based on Both Symbolic Patterns and Amplitude Information". *Entropy,* v. 21, n. 12, 1167. http://dx.doi.org/10.3390/e21121167

[14] Bandt, C.; Pompe, B. (2002). "Permutation entropy: a natural complexity measure for time series". *Physical Review Letters,* v. 88, n. 17, 174102. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174102

[15] Cuesta-Frau, D.; Dakappa, P.H.; Mahabala, C.; Gupta, A.R. (2020). "Fever Time Series Analysis Using Slope Entropy. Application to Early Unobtrusive Differential Diagnosis". *Entropy,* v. 22, n. 9, 1034. http://dx.doi.org/10.3390/e22091034

[16] Kouka, M.; Cuesta-Frau, D. (2023). "Slope Entropy Characterisation: The Role of the delta Parameter". *Engineering Proceedings,* v. 39, n. 1, 67. http://dx.doi.org/10.3390/engproc2023039067

# Influencia del proceso de maceración en las propiedades de colorante extraído del fruto del caqui

**Herráez Aparicio, Víctor[1,2], Guillem-Moral, Cristina[3,4], Monllor-Carbonell, Ignacio[3], Blanes Company, María[1,3], Bou-Belda, Eva[2]**

*(1) G.I. en Salud y Sanidad Ambiental. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España. Contacto: victor.herraez@aitex.es*

*(2) Departamento de Ingeniería Textil y Papelera – Universitat Politècnica de València, Campus de Alcoi. Contacto: evbobel@upvnet.upv.es*

*(3) G.I. en Cosmética y Detergencia. Área I+D, AITEX – Asociación de Investigación de la Industria Textil, Carretera Banyeres, 10, 03802 Alcoi, Alacant, España.*

*(4) Food Microstructure and Chemistry Research Group– Universitat Politècnica de València, Valencia, España.*

## RESUMEN

El creciente interés por el desarrollo de colorantes naturales sostenibles ha impulsado la valorización de subproductos agroalimentarios ricos en compuestos fenólicos. En este estudio se evalúa la influencia del tiempo de maceración en las propiedades funcionales de extractos de caqui (*Diospyros kaki*) y su contenido en moléculas bioactivas, relacionando este proceso con el cambio en diferentes propiedades de los extractos.

Los resultados muestran una disminución progresiva del contenido en polifenoles y actividad antioxidante con el aumento del tiempo de maceración, atribuida a procesos de oxidación y transformación de compuestos fenólicos. Las proantocianidinas presentan variaciones en su grado de polimerización, reflejadas en cambios en la relación entre unidades terminales y extensivas, lo que influye en las propiedades cromáticas del extracto. Se observa igualmente una evolución del color hacia tonalidades menos intensas, correlacionada con la degradación de estos compuestos bioactivos.

Estos cambios demuestran que la etapa de maceración condiciona la bioactividad de los extractos, y por tanto las propiedades tintóreas, siendo el control del tiempo en este paso fundamental para el desarrollo de los colorantes extraídos a partir de caqui.

**Palabras clave:** caqui, colorantes naturales, polifenoles, proantocianidinas, antioxidante, color, extractos naturales

## INTRODUCCIÓN

Los colorantes naturales han adquirido un enorme potencial comercial gracias a la concienciación medioambiental de la población. Existen diversas fuentes de obtención de compuestos coloreados de origen natural, desde vegetales, animales o residuos. Los extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos representan una alternativa de alto valor añadido, debido a su capacidad antioxidante y su contribución al color [1].

Los frutos inmaduros del caqui (*Diospyros kaki*), uno de los cultivos tradicionales explotados en la Comunidad Valenciana, tienen un gran contenido en proantocianidinas (también conocidas como taninos condensados). La estructura propuesta para este tanino (en adelante PT) consiste en unidades de catequina (R1 = R2 = H), ácido gálico

y galocatequina (R1 = OH, R2 = H), esterificadas mediante enlaces carbonos C-6 y C-8 con C-4 [2]:

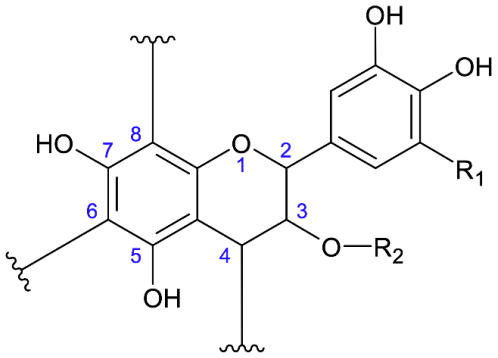



**Figura 1.** Estructura propuesta de los monómeros constituyentes de las proantocianidinas presentes en el fruto de *Diospyros kaki* [2].

En países como Corea o Japón, este zumo de caqui se somete a un proceso de maceración y fermentación, que aumenta el poder de tintura de este [3]. En este trabajo, se profundiza en el proceso de maceración y su implicación en las transformaciones estructurales.

Las proantocianidinas, y en general los compuestos polifenólicos, son compuestos que presentan una elevada capacidad antioxidante y contribuyen de manera directa a las propiedades cromáticas de los extractos [4]. Sin embargo, su estabilidad es limitada y se ve afectada por variables de proceso como la maceración, que puede inducir fenómenos de oxidación, polimerización o insolubilización [5].

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la influencia del tiempo de maceración en el contenido de moléculas bioactivas de extractos de *Diospyros kaki* para su uso como colorante natural.

## METODOLOGÍA

En primer lugar, se prepara el extracto de los frutos de *Diospyros kaki* mezclando agua con los frutos en proporción 1:1 y triturando hasta obtener una suspensión homogénea. Esta mezcla se macera a temperatura ambiente y en oscuridad. Se toman alícuotas cada dos días para evaluar diferentes propiedades, descritas a continuación.

La concentración de polifenoles totales se cuantifica utilizando el método de Folin-Ciocalteu [6]. De forma concisa, el reactivo de Folin-Ciocalteu se adiciona a la muestra en medio básico (en este caso con carbonato de sodio) y se incuba a 45 ºC durante 15 minutos. Después, se lee la absorbancia a 765 nm. Este método se estandariza con ácido gálico (Scharlab, España) como polifenol de referencia.

El contenido en proantocianidinas se evalúa utilizando dos métodos colorimétricos diferentes: el método de la vanillina en ácido acético [7] y el método del butanol en ácido clorhídrico [8]. Brevemente, el método de la vanillina consiste en adicionar el reactivo de vanillina (vanillina al 0,5% en ácido acético, con HCl al 4%) a la muestra, incubar a 30

ºC durante 20 minutos y leer la absorbancia a 510 nm. Por otro lado, el método del butanol consiste en adicionar el reactivo del butanol (n-butanol al 95% con HCl) y el catalizador de hierro (en esta caso, sulfato de hierro y amonio) a la muestra e incubar a 95ºC durante 50 minutos. Posteriormente se lee la absorbancia a 500 nm. Estos métodos se estandarizan en el primer caso con catequina (Merck, Alemania) y con proantocianidinas extraídas y purificadas de Uva (Merck, Alemania) en el segundo.

La actividad antioxidante se determina con la Capacidad Antioxidante Total (TAC), cuantificada por kits (Merck, Alemania). Este método emplea cationes de cobre (II) que en presencia de agentes reductores se reduce a cobre (I). Empleando complejos específicos con el cobre (I), se lee la concentración a 570 nm y se relaciona con la concentración de compuestos antioxidantes. Este kit emplea Trolox (CAS 53188-07-1, Merck, Alemania) como estándar.

En la Tabla 1 se muestran todas las curvas de calibración para los diferentes ensayos realizados, con los parámetros característicos de cada curva.

**Tabla 1.** Curvas de calibración para cada método espectrofotométrico.

| Ensayo colorimétrico | Estándar | Ordenada | Pendiente | R2 |
|---|---|---|---|---|
| Vanillina/Acético | Catechin | 0,010 | 14,99 | 0,9999 |
| Butanol/HCl | Grape Proanthocyanidin | 0,161 | 1,01 | 0,98976 |
| Folin-Ciocalteu | Ácido Gálico | 0,007 | 0,015 | 0,998 |
| TAC | Trolox | -0,0078 | 0,0012 | 0,9991 |

Por último, se realiza un ensayo colorimétrico para determinar las coordenadas en el espacio CIELab de los extractos. Para ello, se utiliza un colorímetro Konica Minolta XM-5, con accesorio de medida de líquidos, observador 10º e iluminante D65. Los resultados se obtienen en coordenadas de color CIELab, y se calcula la diferencia de color respecto a la muestra inicial utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{\left(L^*_{t_0} - L^*_{t_n}\right)^2 + \left(a^*_{t_0} - a^*_{t_n}\right)^2 + \left(b^*_{t_0} - b^*_{t_n}\right)}$$

Siendo $L^*, a^*\ y\ b^*$ las coordenadas cromáticas para la referencia ($t_0$) y para los demás tiempos de maceración ($t_n$)

## RESULTADOS

En general, se observa que el proceso de maceración provoca transformaciones en la estructura química de la fracción fenólica del extracto, lo que afecta tanto a la composición como a las propiedades funcionales. A continuación, se muestran los resultados de la medida de proantocianidinas, según el método de la Vanillina y del Butanol descritos anteriormente, los polifenoles y el grado medio de polimerización.

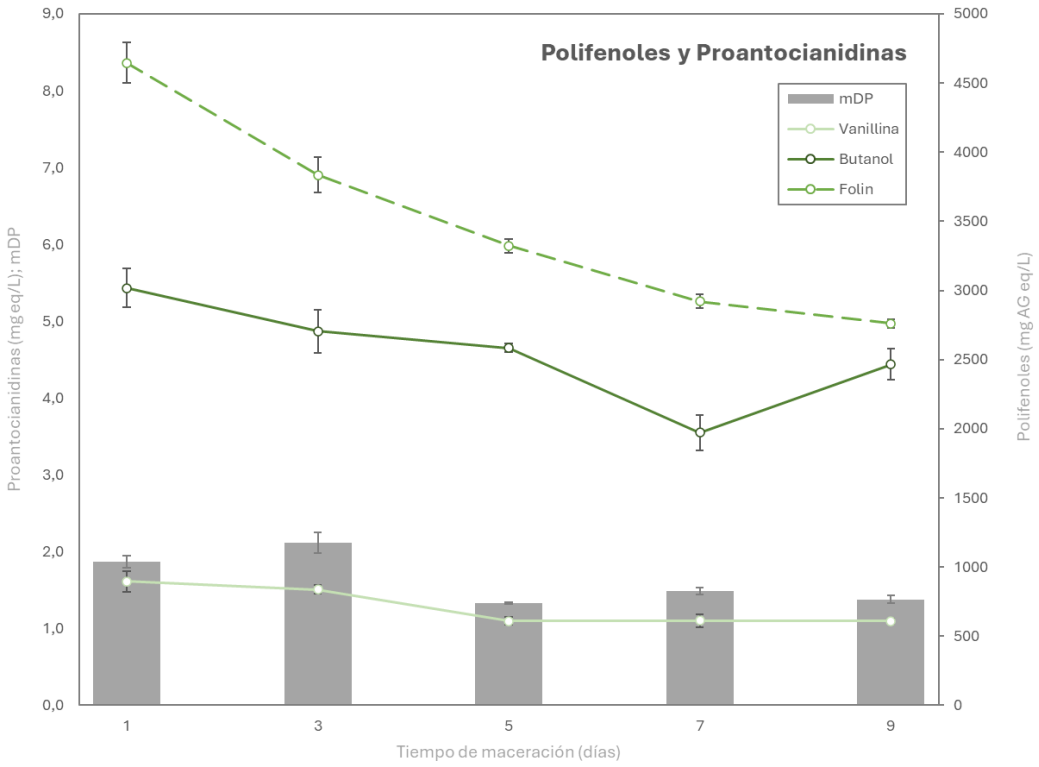



**Figura 1.** Cambios en la concentración de polifenoles y proantocianidinas según el tiempo de maceración.

Se observa que el contenido de polifenoles totales disminuye con el tiempo de maceración. Estos resultados pueden atribuirse principalmente a procesos de oxidación química y enzimática (polifenol oxidasa), así como a reacciones de condensación e insolubilización de taninos.

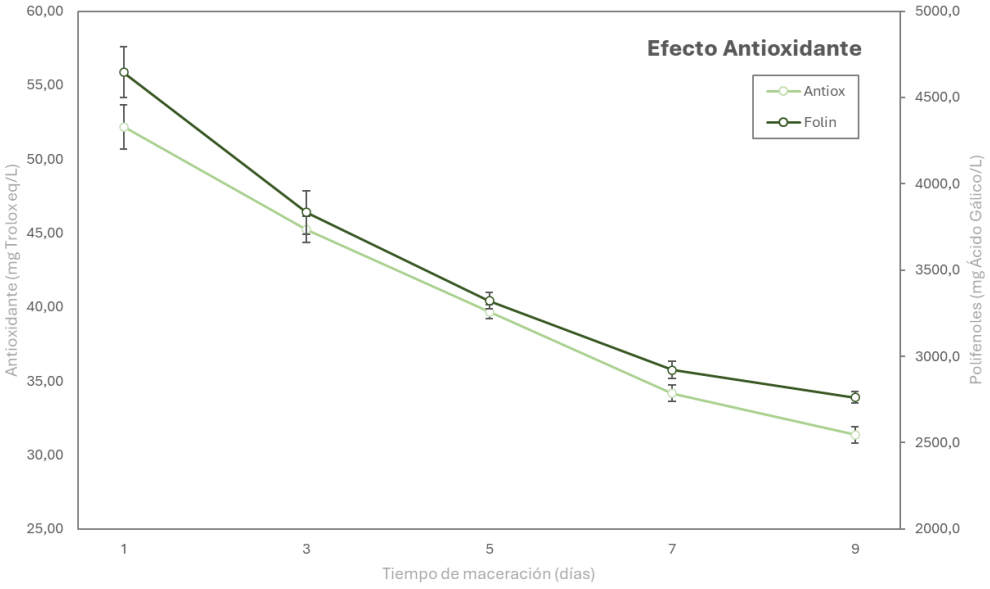



**Figura 2.** Relación de la capacidad antioxidante y el contenido en polifenoles

En particular respecto a las proantocianidinas, las unidades terminales (determinadas mediante el ensayo de la vanillina) de las proantocianidinas parecen mantenerse constantes. Sin embargo, las unidades extensivas (determinadas por el método del butanol) parecen disminuir con este tiempo. Por esta razón, el grado medio de polimerización (relación entre unidades terminales y unidades extensivas) disminuye ligeramente, lo que implica una degradación de estas estructuras poliméricas (Figura 1).

En la **Figura 2** se relaciona la disminución de polifenoles con una disminución de la actividad antioxidante del extracto.

Esta relación implica que la fracción fenólica es la principal responsable de la capacidad del extracto, y está relacionado también con la degradación de las estructuras poliméricas comentadas anteriormente, hacia especies más oxidadas (como quinonas), con menor capacidad de donar electrones. Se observa también, con el tiempo de maceración, un cambio en el color del extracto, relacionado con los cambios estructurales de las proantocianidinas comentados anteriormente. En la siguiente figura se muestra la diferencia de color a diferentes tiempos del extracto con el color del extracto inicial, basado en las coordenadas cromáticas CIELab (Figura 3).

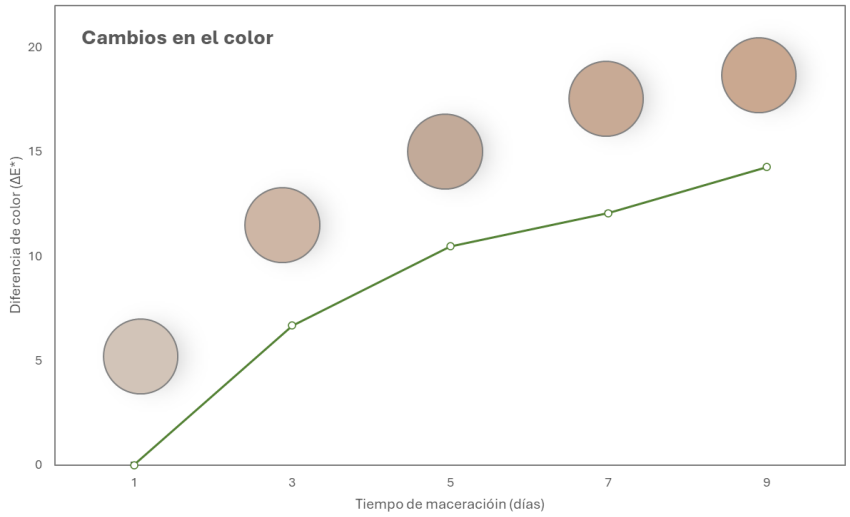



**Figura 3.** Cambios en el color del extracto con el tiempo de maceración.

El color de los extractos cambia, hacia colores más oscuros (menor valor de L*), más rojos (mayores valores de a*) y más amarillos (valores más altos de b*). Estos cambios cromáticos están estrechamente relacionados con los cambios estructurales; aumentando la oxidación se obtiene también un extracto más oscuro.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados, se concluye que el proceso de maceración de los extractos acuosos de los frutos de *Diospyros kaki* no actúa únicamente como una etapa de extracción, sino como una etapa de reacción en el que se producen transformaciones químicas significativas de los compuestos fenólicos. El tiempo de maceración da lugar a una disminución del contenido en polifenoles y de la actividad antioxidante, asociada a fenómenos de oxidación de estos polifenoles. Al mismo tiempo, las proantocianidinas experimentan cambios estructurales, observándose una reducción de las unidades extensivas y una ligera disminución del grado medio de polimerización (mDP), también

relacionado con procesos de degradación. Además, estos cambios estructurales se ven reflejados en un cambio de sus propiedades cromáticas, dando lugar a extractos más oscuros. Es necesario, por otra parte, profundizar en la naturaleza de estas reacciones de transformación, con el fin de discriminar si se trata de un proceso puramente químico o si por el contrario requiere de microorganismos activos.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado dentro del proyecto VINNY, financiado por la Unión Europea bajo el GA número 101130039.

## REFERENCIAS

[1] Cardon, D. (2007). "Natural dyes. Sources, tradition, technology and science". London: Archetype Publications. https://archetype.co.uk/our-titles/natural-dyes/?id=141

[2] Nakatsubo, F.; Enokita, K.; Murakami, K.; Yonemori, K.; Sugiura, A.; Utsunomiya, N.; Subhadrabandhu, S. (2002). "Chemical structures of the condensed tannins in the fruits of Diospyros species". Journal of Wood Science, v. 48, p.p. 414-418. https://doi.org/10.1007/BF00766302

[3] Park, S. J. (2011). "Comparative study on the manufacturing process of persimmon juice, persimmon dyeing method, and transfiguration of persimmon-dyed items in Korea and Japan". The Korean Journal of Community Living Science, v. 22, n. 1, p.p. 77-94. https://doi.org/10.7856/kjcls.2011.22.1.077

[4] Kashif, M.; Akhtar, N.; Mustafa, R. (2017). "An overview of dermatological and cosmeceutical benefits of Diospyros kaki and its phytoconstituents". Revista Brasileira de Farmacognosia, v. 27, n. 5, p.p. 650-662. https://doi.org/10.1016/j.bjp.2017.06.004

[5] Xu, S.; Zou, B.; Yang, J.; Yao, P.; Li, C. (2011). "Characterization of a highly polymeric proanthocyanidin fraction from persimmon pulp with strong Chinese cobra PLA2 inhibition effects". Fitoterapia, v. 83, n. 1, p.p. 153-160. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2011.10.005

[6] García Martínez, E. M.; Fernández Segovia, I.; Fuentes López, A. (2015). "Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu". http://hdl.handle.net/10251/52056

[7] Butler, L. G.; Price, M. L.; Brotherton, J. E. (1982). "Vanillin assay for proanthocyanidins (condensed tannins): modification of the solvent for estimation of the degree of polymerization". Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 30, n. 6, p.p. 1087-1089. https://doi.org/10.1021/jf00114a020

[8] Gessner, M. O.; Steiner, D. (2005). "Acid butanol assay for proanthocyanidins (condensed tannins)". En: Methods to study litter decomposition: a practical guide. Springer Netherlands, p.p. 107-114. https://doi.org/10.1007/1-4020-3466-0_15

# Influencia del tratamiento térmico de la haloisita en la adsorción de C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL

**Teresa Rutschi-De-Cea[(1)], María Jesús García-Campo[(2)], Daniel López-Rodríguez[(2)], Bàrbara Micó-Vicent[(3)]**

*(1) Escuela de doctorado, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, trutshi@aquaclean.com.*
*(2) Departamento de Matemática Aplicada, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoi, Spain, magarca5@upvnet.upv.es, dalorod@upv.es.*
*(3) Departamento de Ingeniería Gráfica, Universitat Politècnica de València, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoi, Spain, barmivi@eio.upv.es.*

## RESUMEN

Se evalúa el efecto del tratamiento térmico de la haloisita sobre la adsorción de los colorantes directos aniónicos C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL. Se integran resultados previos de Red 83 con una nueva serie experimental para Blue 4BL, empleando haloisita sin tratamiento y haloisita tratada a 250 °C durante 3 h, 1000 °C durante 3 h y 1000 °C durante 6 h. Para el colorante azul se revisó el cálculo espectrofotométrico: la calibración original se había construido con transmitancia directa, por lo que las lecturas se transformaron a absorbancia mediante A = -log10(T/100). La recta corregida a 410 nm fue A = 3,4007C + 0,0095, con $R^2$ = 0,99996. Los datos comparativos indican que el tratamiento moderado a 250 °C mantiene el comportamiento más favorable, mientras que el tratamiento severo a 1000 °C reduce la eliminación estimada del Blue 4BL. Las medidas del colorante azul quedan fuera del intervalo de calibración y se interpretan como estimaciones extrapoladas que requieren confirmación analítica.

**Palabras clave:** haloisita, adsorción, colorantes directos, tratamiento térmico, Direct Red 83, Direct Blue 4BL.

## INTRODUCCIÓN

Los efluentes textiles contienen colorantes de elevada visibilidad y persistencia, por lo que la adsorción continúa siendo una alternativa simple para la reducción de la carga cromática. La haloisita es un aluminosilicato tubular del grupo del caolín con superficies químicamente diferenciadas: una superficie externa rica en siloxano y un lumen con grupos aluminol. Esta dualidad facilita interacciones con contaminantes orgánicos, aunque la adsorción de colorantes aniónicos depende de la accesibilidad de los grupos Al-OH, del estado superficial y de la carga efectiva del material [1,5,6].

El tratamiento térmico modifica la estructura de la haloisita. A temperaturas moderadas se elimina agua adsorbida o interlaminar, mientras que a temperaturas superiores se produce dehidroxilación, amorfización parcial y eventual deterioro de la morfología nanotubular [1-4]. En trabajos previos con C.I. Direct Red 83, la muestra HA2503 fue la más eficiente, seguida de HA6003, HA6008 y HA0000. En esta comunicación se combina ese comportamiento con una nueva serie de C.I. Direct Blue 4BL, orientada a comprobar si el aumento de temperatura del tratamiento térmico mejora o penaliza la eliminación de otro colorante directo aniónico.

La elección de un pretratamiento térmico adecuado es relevante porque condiciona simultáneamente la capacidad de adsorción y la viabilidad operativa del proceso. Un aumento de temperatura puede favorecer la eliminación de agua retenida y la exposición de determinadas zonas activas, pero también puede provocar pérdida de grupos hidroxilo, contracción estructural o disminución de la afinidad por moléculas con elevada carga aniónica. Por este motivo, la comparación entre un tratamiento moderado y tratamientos severos permite diferenciar entre una activación útil de la haloisita y una modificación excesiva del sólido. En el caso de colorantes directos, esta distinción es especialmente importante, ya que la interacción adsorbente-colorante depende tanto de la composición superficial como del tamaño molecular, la aromaticidad y la presencia de grupos sulfonato.

## OBJETIVOS

El objetivo general es comparar la influencia del tratamiento térmico de la haloisita en la eliminación de C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL. Los objetivos específicos son corregir el cálculo espectrofotométrico del colorante azul, integrar los resultados con los datos previos del colorante rojo y valorar la conveniencia de tratamientos térmicos moderados o severos desde una perspectiva de rendimiento adsorbente.

## EXPERIMENTAL

### Materiales

Se utilizó nanoarcilla de haloisita obtenida de Southern Clay Products (Gonzales, TX, USA). El colorante utilizado en la nueva serie experimental fue C.I. Direct Blue 4BL, obtenido de Comercial Química Massó (Barcelona, España) (Figura 1).

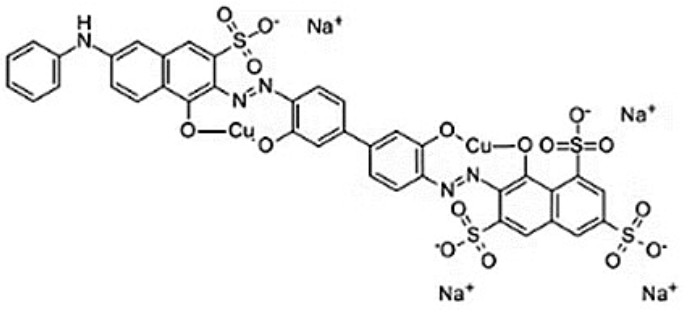



**Figura 1.** Estructura química del colorante C.I. Direct Blue 4BL.

### Métodos

Los resultados de C.I. Direct Red 83 proceden del estudio previo realizado con $C_0$ = 18 g/L y haloisita a 8 g/L. Las condiciones de tratamiento térmico fueron: haloisita sin tratamiento, 250 °C durante 3 h, 600 °C durante 3 h y 600 °C durante 8 h.

Para el estudio de C.I. Direct Blue 4BL se utilizó nanoarcilla sin pretratamiento térmico y nanoarcilla sometida a distintos pretratamientos. La muestra HA2503-1 se encontraba previamente preparada a 250 °C durante 3 h. Para las muestras HA10003-24 y HA10006-24 se introdujeron 1,2 g de nanoarcilla en vasos cerámicos y se trataron en mufla a 1000 °C durante 3 h y 6 h, respectivamente (Tabla 1).

**Tabla 1.** Condiciones de tratamiento térmico incluidas en la serie C.I. Direct Blue 4BL.

| Código | Muestra | Tratamiento térmico | $C_0$ (g/L) | HNT (g/L) |
|---|---|---|---|---|
| A | HA0000-1 | Sin tratamiento térmico | 13.733 | 8 |
| B | HA2503-1 | 250 °C durante 3 h | 13.733 | 8 |
| C | HA10003-24 | 1000 °C durante 3 h | 13.733 | 8 |
| D | HA10006-24 | 1000 °C durante 6 h | 13.733 | 8 |

Una vez obtenidas las nanoarcillas, estas se añadieron a una disolución de C.I. Direct Blue 4BL con $C_0$ = 13,733 g/L, calculada a partir de 2,06 g de colorante en 150 mL de agua destilada. Las muestras A y B se mantuvieron en agitación durante 1 h, mientras que C y D se mantuvieron durante 24 h. Posteriormente se separó la nanoarcilla por filtración (Figura 2) y se analizó el sobrenadante mediante espectrofotometría UV-VIS-NIR tras preparar diluciones 1:25.

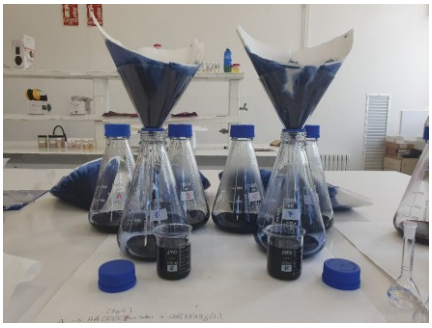


**Figura 2.** Disoluciones de C.I. Direct Blue 4BL tras la adsorción y filtrado.

Para expresar cuantitativamente la adsorción se emplearon el porcentaje de eliminación (R) y la capacidad de adsorción (q):

$$R(\%) = ((C_0 - C_E)/C_0) \cdot 100$$

$$q = (C_0 - C_e)/C_HNT$$

donde $C_0$ es la concentración inicial de colorante, $C_e$ la concentración final después de la adsorción y C_HNT la concentración de haloisita. Las lecturas de transmitancia del espectrofotómetro se transformaron a absorbancia mediante A = -log10(T/100). Para C.I. Direct Blue 4BL se ajustó la recta de calibrado a 410 nm (Figura 3). La concentración residual se calculó como $C_e$ = Cmedida · 25 y, a partir de ella, se calcularon R y q.

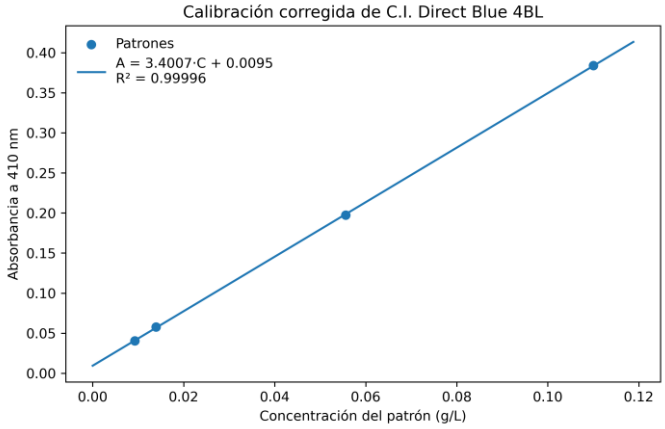



**Figura 3.** Calibración corregida de C.I. Direct Blue 4BL usando absorbancia a 410 nm.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la medición espectrofotométrica se resumen en la Tabla 2. En la serie de C.I. Direct Blue 4BL se utilizó una longitud de onda de 410 nm, correspondiente a la zona donde las muestras presentaban absorbancias altas.

**Tabla 2.** Resultados comparativos de C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL.

| Colorante | Muestra | Tratamiento térmico | $C_e$ (g/L) | Cads (g/L) | R (%) | q (g/g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Red 83 | HA0000 | Sin tratamiento | 1.536 | 16.464 | 91.47 | 2.058 |
| *Red 83 | HA2503 | 250 °C, 3 h | 0.705 | 17.295 | 96.08 | 2.162 |
| *Red 83 | HA6003 | 600 °C, 3 h | 0.758 | 17.242 | 95.79 | 2.155 |
| *Red 83 | HA6008 | 600 °C, 8 h | 1.215 | 16.785 | 93.25 | 2.098 |
| Blue 4BL | HA0000 | Sin tratamiento | 7.145 | 6.589 | 47.98 | 0.824 |
| Blue 4BL | HA2503 | 250 °C, 3 h | 6.272 | 7.461 | 54.33 | 0.933 |
| Blue 4BL | HA10003 | 1000 °C, 3 h | 9.122 | 4.612 | 33.58 | 0.576 |
| Blue 4BL | HA10006 | 1000 °C, 6 h | 10.052 | 3.682 | 26.81 | 0.460 |

* Nota: los valores de Red 83 proceden del estudio previo; los valores de Blue 4BL son extrapolados porque las lecturas quedan por encima del intervalo de calibración.

La revisión del cálculo del colorante azul confirma que la recta original basada en transmitancia directa no es la formulación más adecuada para la cuantificación espectrofotométrica. Al aplicar la transformación a absorbancia, la linealidad mejora de $R^2 = 0,99086$ a $R^2 = 0,99996$. Sin embargo, las muestras A-D quedan por encima del intervalo calibrado, por lo que los valores de azul deben considerarse estimaciones extrapoladas.

En C.I. Direct Red 83 se mantiene el orden de eliminación HA2503 > HA6003 > HA6008 > HA0000, con porcentajes entre 91,47 % y 96,08 %. Este patrón es coherente con la eliminación de agua interlaminar a 250 °C, que mejora la accesibilidad de sitios activos sin destruir la estructura nanotubular. A 600 °C se inicia la dehidroxilación y la pérdida progresiva de grupos O-H, con descenso de rendimiento cuando el tratamiento térmico se prolonga. Para C.I. Direct Blue 4BL, el recálculo de A-D muestra una mayor eliminación estimada en HA2503 (54,33 %) que en HA0000 (47,98 %). Las muestras tratadas a 1000 °C presentan valores inferiores: 33,58 % para HA10003 y 26,81 % para HA10006. Esta tendencia apoya que el tratamiento moderado puede mejorar la adsorción, mientras que un tratamiento severo reduce la funcionalidad superficial disponible (Figura 4).

La comparación entre ambos colorantes debe realizarse con cautela, ya que los datos de azul requieren confirmación analítica. Aun así, la dirección de los resultados es consistente: la haloisita tratada a 250 °C aparece como la opción más favorable entre las condiciones evaluadas, mientras que el tratamiento a 1000 °C no aporta mejora frente a tratamientos menos energéticos.

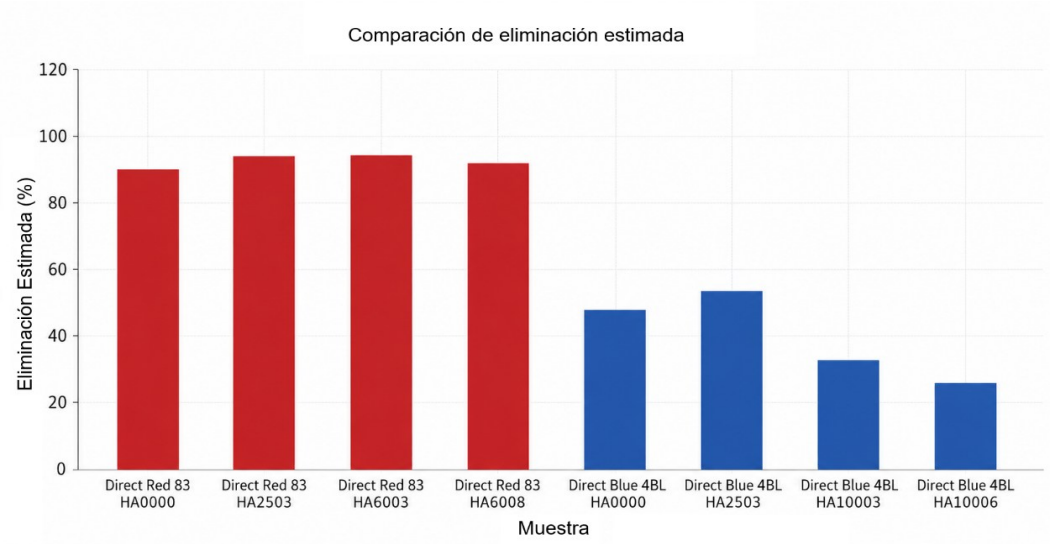



**Figura 4.** Comparación de eliminación estimada para C.I. Direct Red 83 y C.I. Direct Blue 4BL.

## DISCUSIÓN

La diferencia observada entre Red 83 y Blue 4BL no debe interpretarse únicamente como una consecuencia del tratamiento térmico, sino también como resultado de la naturaleza molecular de cada colorante. Ambos compuestos se comportan como colorantes directos aniónicos, pero pueden presentar distinta accesibilidad a los sitios activos de la haloisita, diferente tendencia a agregarse en disolución y distinta respuesta frente a los cambios de carga superficial del adsorbente. En este contexto, el tratamiento a 250 °C parece conservar la estructura tubular y, al mismo tiempo, mejorar la disponibilidad de zonas de interacción. Por ello, la mejora obtenida para HA2503 es coherente con una activación moderada del material, sin llegar a las alteraciones estructurales asociadas a temperaturas más elevadas.

Los tratamientos a 1000 °C muestran un comportamiento menos favorable para Blue 4BL. La reducción de la eliminación estimada puede relacionarse con la dehidroxilación intensa y con la transformación parcial de la haloisita en una fase menos ordenada, lo que disminuiría la contribución de los grupos Al-OH y de otros puntos superficiales capaces de retener el colorante. Aunque el tiempo de contacto de estas muestras fue mayor que el de HA0000 y HA2503, la eliminación fue inferior, lo que refuerza la idea de que el deterioro de la funcionalidad superficial puede tener más peso que el aumento del tiempo de exposición. Desde una perspectiva aplicada, este resultado es relevante porque un tratamiento más energético no implica necesariamente una mejora adsorbente.

La principal limitación de la serie Blue 4BL es analítica. Las concentraciones calculadas quedan fuera del intervalo de la recta de calibrado, por lo que los porcentajes de eliminación deben utilizarse como tendencia comparativa y no como valores definitivos. Aun así, la corrección basada en absorbancia proporciona una lectura metodológicamente más adecuada que el empleo directo de transmitancia. Para cerrar la comparación sería necesario repetir las medidas con diluciones superiores, ampliar el intervalo de calibración y homogeneizar el tiempo de contacto entre todas las muestras. Estas mejoras permitirían confirmar si la condición HA2503 es óptima también para Blue 4BL o si el resultado observado depende parcialmente de la extrapolación.

## CONCLUSIONES

El recálculo de C.I. Direct Blue 4BL confirma que la cuantificación espectrofotométrica debe realizarse a partir de absorbancia y no mediante transmitancia directa. La transformación A = -log10(T/100) permitió obtener una recta de calibrado con elevada linealidad y revisar la concentración residual de las muestras. Con esta corrección, la serie A-D sugiere que la haloisita tratada a 250 °C durante 3 h presenta el mejor comportamiento para Blue 4BL dentro de las condiciones estudiadas, mientras que los tratamientos a 1000 °C reducen la eliminación estimada. La tendencia es coherente con el estudio previo de C.I. Direct Red 83, donde HA2503 también fue la condición más eficiente. En conjunto, los resultados apoyan que un tratamiento térmico moderado puede aumentar la disponibilidad de sitios de interacción sin comprometer de forma significativa la estructura del material, mientras que un tratamiento severo puede disminuir la funcionalidad superficial necesaria para la adsorción de colorantes aniónicos. Desde el punto de vista aplicado, HA2503 se perfila como la alternativa más prometedora por combinar mejor rendimiento relativo y menor demanda energética frente a tratamientos a 1000 °C. No obstante, las conclusiones cuantitativas sobre Blue 4BL deben considerarse preliminares porque las medidas quedan fuera del intervalo de calibración. Como trabajo futuro inmediato se recomienda repetir la serie con una dilución mayor, ampliar la curva de calibrado, mantener tiempos de contacto equivalentes y analizar la reproducibilidad mediante réplicas. Estas acciones permitirían convertir la tendencia observada en una comparación cuantitativa robusta y definir con mayor precisión la utilidad de la haloisita tratada térmicamente para la eliminación de colorantes directos en efluentes acuosos.

## REFERENCIAS

[1] Yuan, P.; Tan, D.; Annabi-Bergaya, F. (2015). "Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects". Applied Clay Science, v. 112-113, p.p. 75-93. http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.001

[2] Kadi, S.; Lellou, S.; Marouf-Khelifa, K.; Schott, J.; Gener-Batonneau, I.; Khelifa, A. (2012). "Preparation, characterisation and application of thermally treated halloysite". Microporous and Mesoporous Materials, v. 158, p.p. 47-54. http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.03.014

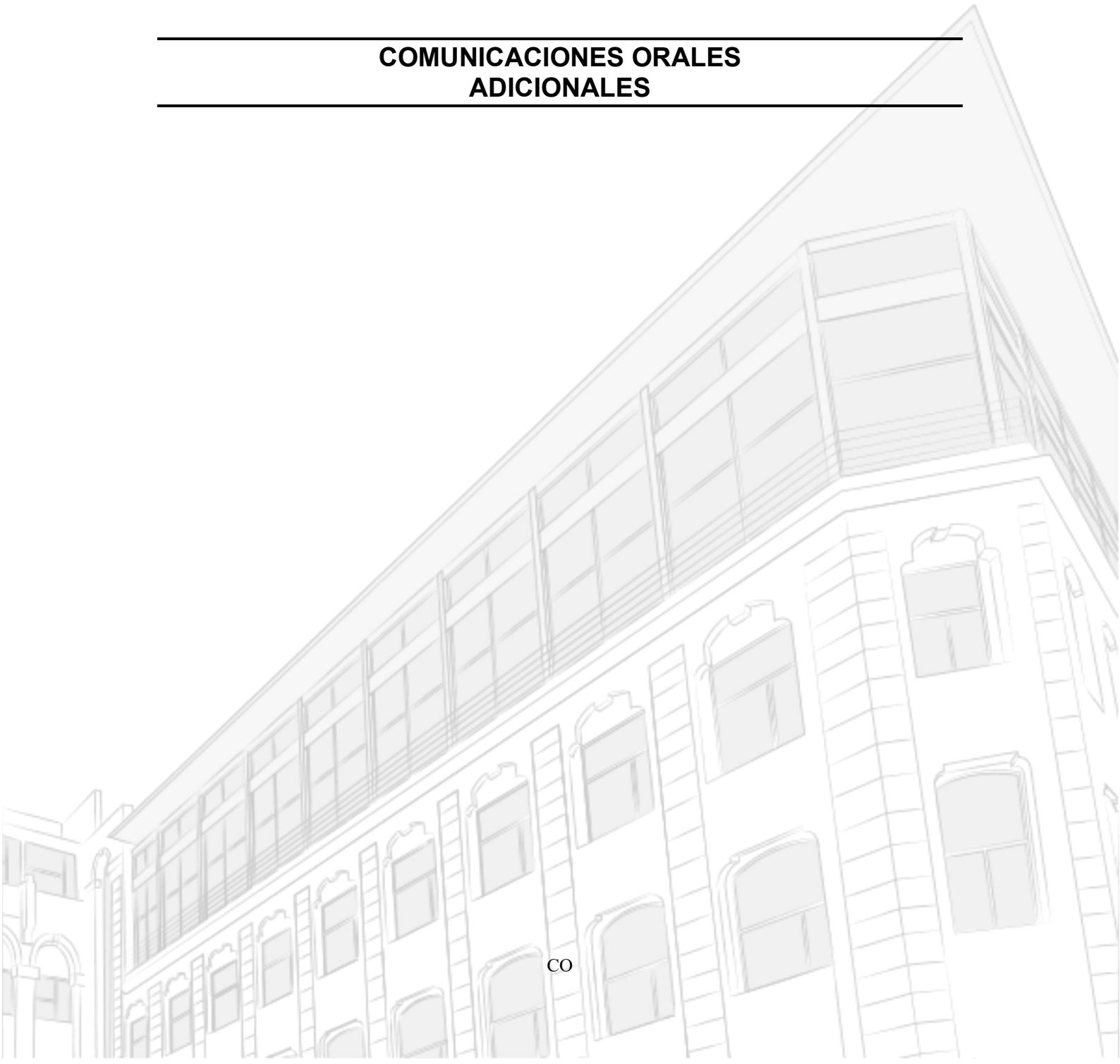
[3] Abotaleb, A.; Gladich, I.; Mroue, K.; Abounahiaa, N.; Alkhateeb, A.; Al-Shammari, A.; Tong, Y.; Al-Masri, D.; Sinopoli, A. (2024). "Impact of thermal treatment on halloysite nanotubes: A combined experimental-computational approach". Heliyon, v. 10, p.p. e39952. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39952

[4] Raghdi, A.; Heraiz, M.; Rasheed, M.; Keziz, A. (2024). "Investigation of halloysite thermal decomposition through differential thermal analysis (DTA): Mechanism and kinetics assessment". Journal of the Indian Chemical Society, v. 101, p.p. 101413. https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101413

[5] Anastopoulos, I.; Mittal, A.; Usman, M.; Mittal, J.; Yu, G.; Núñez-Delgado, A.; Kornaros, M. (2018). "A review on halloysite-based adsorbents to remove pollutants in water and wastewater". Journal of Molecular Liquids, v. 269, p.p. 855-868. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.104

[6] Ngulube, T.; Gumbo, J.R.; Masindi, V.; Maity, A. (2019). "Evaluation of the efficacy of halloysite nanotubes in the removal of acidic and basic dyes from aqueous solution". Clay Minerals, v. 54, n. 2, p.p. 197-207. https://doi.org/10.1180/clm.2019.27

# COMUNICACIONES ORALES ADICIONALES



# Validación CAD–CAE de una autoparte mediante refuerzo localizado con fibra corta en impresión 3D FFF: identificación de zona crítica y uso selectivo de material de altas prestaciones

**Peralta-Zurita, Diana-Belén[(1)], Ferrándiz-Bou, Santiago [(2)], Cobos Maldonado, Christian[(3)]**

*(1) Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Universidad Internacional SEK del Ecuador (UISEK), Albert Einstein y Quinta Transversal,s/n, 170302 Ecuador; diana.peralta@uisek.edu.ec.*

*(2) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València (IUTM),Plaza Ferrandiz Carbonell,s/n, 03801 Alcoi; sferrand@mcm.upv.es.*

*(3) Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y procesos de transformación (GIMAT), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador; ccobos@ups.edu.ec.*

## RESUMEN

La industria automotriz ecuatoriana presenta una alta dependencia de autopartes importadas, especialmente de componentes plásticos de reposición para modelos antiguos o piezas descontinuadas, lo que genera tiempos de abastecimiento prolongados, mayores costos y una disponibilidad local limitada. Este trabajo propone una alternativa de fabricación mediante manufactura aditiva FFF, orientada a la producción local de autopartes con refuerzo localizado en zonas críticas. La metodología integró la digitalización tridimensional mediante escaneo 3D, la reconstrucción CAD, la generación de malla de elementos finitos, la simulación de impacto lateral, la zonificación estructural, la segmentación del modelo y la parametrización del proceso de impresión 3D. A partir del análisis por elementos finitos se identificaron regiones críticas de concentración de esfuerzos, equivalentes aproximadamente al 17–20 % del volumen total de la pieza, destinadas al uso de Kevlar-ABS, mientras que las zonas de menor exigencia estructural fueron fabricadas con PETG. La simulación empleó una malla de 194.714 elementos tetraédricos y 54.242 nodos. Los resultados evidencian que el refuerzo localizado permite optimizar el desempeño mecánico, el peso, el costo y el consumo de material, lo que demuestra el potencial de la manufactura aditiva para atender las autopartes descontinuadas y fortalecer las capacidades locales de diseño, simulación y fabricación.

**Palabras clave:** Manufactura aditiva FFF; refuerzo localizado; Kevlar-ABS; PETG; elementos finitos; autopartes.

## INTRODUCCIÓN

La industria automotriz ecuatoriana mantiene una fuerte dependencia de autopartes importadas, principalmente de componentes plásticos de carrocería, piezas exteriores, cubiertas, molduras, carcasas, rejillas, tapas, soportes y elementos de protección[1]. Esta dependencia se vuelve crítica cuando las piezas corresponden a modelos antiguos, vehículos de alta circulación, componentes de baja rotación comercial o autopartes descontinuadas por el fabricante[2].

En estos escenarios, el usuario final y los talleres automotrices enfrentan tiempos de espera prolongados, incrementos en los costos logísticos y limitaciones para completar las reparaciones a tiempo[3].

La disponibilidad de repuestos no depende únicamente de la demanda del mercado, sino también de factores como el país de origen, los procesos de compra internacional, el transporte marítimo, la desaduanización, los aranceles, los trámites documentales, el transporte interno y los márgenes de intermediación. El proceso completo de importación puede tomar aproximadamente 60 días e incluso llegar a cuatro meses [4], [5]. En las actividades de levantamiento de información del proyecto se identificaron tiempos de abastecimiento que pueden ir de varias semanas a varios meses, particularmente cuando se trata de piezas de baja rotación o de componentes solicitados bajo pedido. Esta condición afecta la operatividad de talleres, centros de colisiones, concesionarios y usuarios particulares.

La manufactura aditiva es una de las estrategias tecnológicas óptimas para enfrentar este tipo de problemas, especialmente como alternativa para la fabricación de autopartes plásticas no estructurales[6]. A diferencia de los procesos de manufactura tradicionales, que requieren grandes líneas de producción y costos en cada etapa, como la inyección de plástico, que implica altos costos iniciales asociados a los moldes, la impresión 3D permite fabricar piezas bajo demanda, reducir inventarios, reproducir componentes descontinuados y ajustar diseños según las necesidades reales del mercado[7], [8].

Sin embargo, para que esta estrategia sea técnicamente válida, es necesario integrar la ingeniería inversa, el control dimensional, la simulación estructural, la selección adecuada de materiales, la caracterización mecánica y la validación funcional como parte de una estrategia de ingeniería concurrente[9], [10].

El proyecto plantea una estrategia de fabricación inteligente orientada a la reproducción digital de autopartes, al análisis por elementos finitos y a la fabricación con materiales accesibles en el mercado, en la que el propio proceso genera un material compuesto en la interfase entre los materiales[11]. Uno de los aspectos centrales de la propuesta es la aplicación de refuerzo localizado[12].

Esta estrategia consiste en identificar, mediante simulación CAE/FEM, las zonas críticas de la autoparte donde se concentran los mayores esfuerzos, deformaciones o riesgos de falla, para aplicar allí materiales de mayor desempeño[13], [14]. El resto de la pieza puede fabricarse con materiales de menor costo y con adecuada procesabilidad, optimizando la relación entre resistencia, peso, costo, tiempo de fabricación y consumo de material[15].

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto de investigación es desarrollar una metodología de fabricación aditiva localizada para autopartes plásticas de difícil disponibilidad en el mercado ecuatoriano, mediante la integración de ingeniería inversa, escaneo 3D, simulación por elementos finitos y materiales compuestos, con el fin de reducir la dependencia de las importaciones y validar técnicamente alternativas fabricadas localmente.

De este propósito se derivaron objetivos específicos orientados a:

- Identificar autopartes plásticas de alta demanda y baja disponibilidad en el mercado ecuatoriano, mediante el análisis de la disponibilidad comercial, la

frecuencia de reemplazo y las necesidades del sector automotriz, para la selección de componentes candidatos para la fabricación aditiva localizada.

- Aplicar técnicas de ingeniería inversa en autopartes plásticas seleccionadas mediante escaneo 3D y reconstrucción CAD, para la obtención de modelos digitales precisos destinados al proceso de fabricación aditiva.
- Evaluar el comportamiento estructural de las autopartes digitalizadas mediante simulación por elementos finitos bajo condiciones de carga representativas, a fin de determinar las zonas críticas y los requisitos mecánicos del componente.
- Proponer estrategias de refuerzo localizado en las autopartes plásticas, mediante el uso de materiales compuestos y criterios de optimización estructural, para la mejora de la resistencia mecánica y desempeño funcional de los prototipos fabricados.
- Fabricar prototipos funcionales de autopartes plásticas, mediante tecnologías de impresión 3D y materiales compuestos seleccionados, para la validación física de la metodología de manufactura propuesta.
- Analizar la viabilidad técnica y económica de los prototipos fabricados mediante comparación funcional, estructural y de costos con piezas convencionales o importadas, y determinar la factibilidad de la fabricación aditiva en el contexto ecuatoriano.

## RESULTADOS

El primer resultado, como se observa en la Figura 1, consiste en la elaboración de una ruta metodológica para atender autopartes plásticas de baja disponibilidad local. La estrategia integra el levantamiento de información del sector, la selección del componente, la digitalización tridimensional, la reconstrucción en CAD, la simulación por elementos finitos (CAE/FEM), la zonificación estructural, la segmentación por materiales y la fabricación mediante impresión 3D.

Esta integración permite que la manufactura aditiva deje de ser una actividad aislada de prototipado y se convierta en una alternativa técnica para la producción de piezas de reposición bajo demanda.

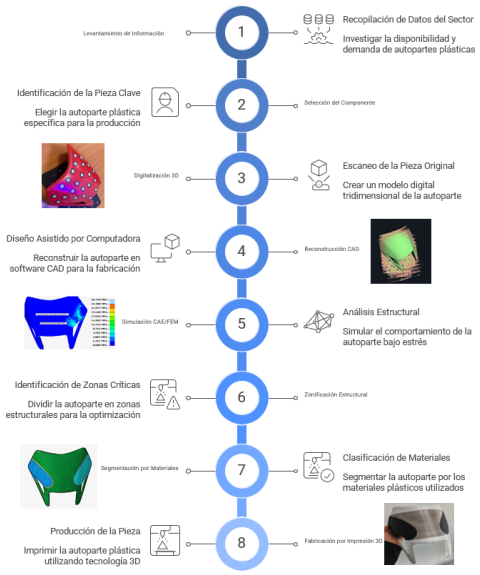



**Figura 1.** Ruta metodológica con Ingeniería Concurrente

El componente seleccionado fue una carcasa de faro de motocicleta Honda, representativa de piezas plásticas expuestas a impactos, vibración, deterioro ambiental y dificultades de reposición. Mediante escaneo 3D se obtuvo la geometría del componente, la cual fue posteriormente depurada y reconstruida en CAD, como se muestra en la Figura 2.

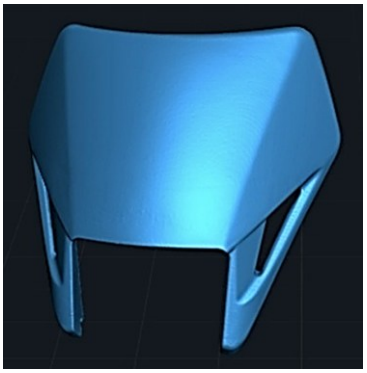


**Figura 2.** Autoparte 3D digitalizada

La simulación de impacto lateral permite identificar las zonas críticas con la mayor concentración de esfuerzos. Para este fin se genera una malla tetraédrica de 194.714 elementos y 54.242 nodos, manteniendo las mismas condiciones de análisis entre la pieza original y la propuesta con refuerzo localizado. En la Figura 3 se observa que las zonas críticas se asocian con áreas laterales, puntos de anclaje y zonas expuestas a la concentración de cargas.

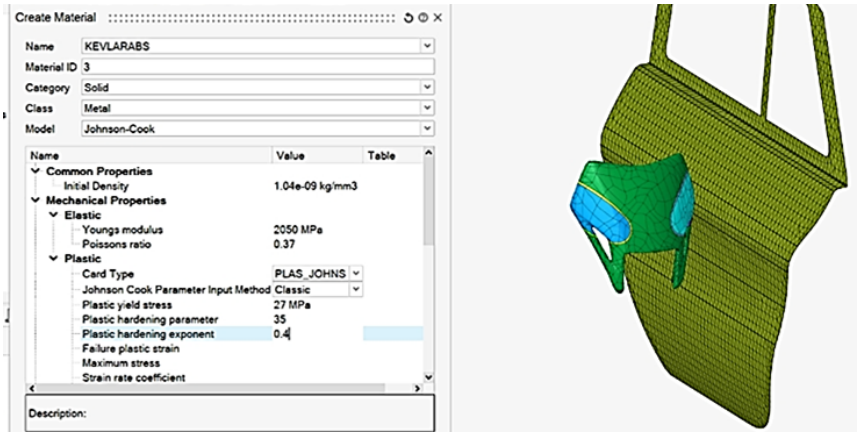



**Figura 3.** Simulación lateral FEM de Impacto

A partir del análisis por elementos finitos, se determina que la autoparte requiere un refuerzo del material compuesto Kevlar-ABS del 17 % al 20 % en la zona crítica del volumen total de la carcasa. Colocando únicamente el material o filamento de alto desempeño en la zona crítica netamente en el área que lo requiere. Así se emplea el material PETG en las zonas de menor exigencia estructural.

La parametrización en la zona de interfaz de transición entre los 2 materiales es clave, como se observa en los parámetros de la Tabla 1, cumpliendo así con un requisito clave de la ingeniería concurrente, como el principio de diseño eficiente, colocando el material de alta prestación donde la simulación muestra una demanda mecánica real.

**Tabla 1.** Parámetros de impresión material compuesto mediante FFF.

| Categoría | Parámetro | Valor | Criterio técnico |
|---|---|---|---|
| **Temperatura** | Extrusión PETG | 230 °C | Dentro del rango operativo 220–240 °C. |
| | Extrusión Kevlar-ABS | 245 °C | +15 °C frente al ABS puro para compensar mayor viscosidad por fibras. |
| | Plataforma | 95 °C | Reduce los gradientes térmicos y minimiza el warping. |
| **Velocidad** | Impresión general | 50 mm/s | Equilibrio entre estabilidad, calidad y tiempo. |
| | Perímetros externos | 40 mm/s | Mejora el acabado superficial y la precisión. |
| | Primera capa | 20 mm/s | Favorece la adhesión inicial a la plataforma. |
| | Relleno interno | 60 mm/s | Reduce el tiempo de impresión en las zonas no visibles. |

En la etapa de parametrización se evaluaron configuraciones de fabricación FFF con un sistema de extrusión múltiple. Se consideraron patrones de relleno triangular, giroide y rejilla, con una densidad del 35 %, además de parámetros como la temperatura, la velocidad, la altura de capa, el número de perfiles, la orientación de impresión y la compatibilidad entre materiales.

Esta fase permitió establecer condiciones de fabricación para obtener una pieza funcional y reproducible, reduciendo los riesgos asociados a cambios en el extrusor, a la adhesión entre ambos materiales y a las irregularidades de impresión, como se muestra en la Figura 4.

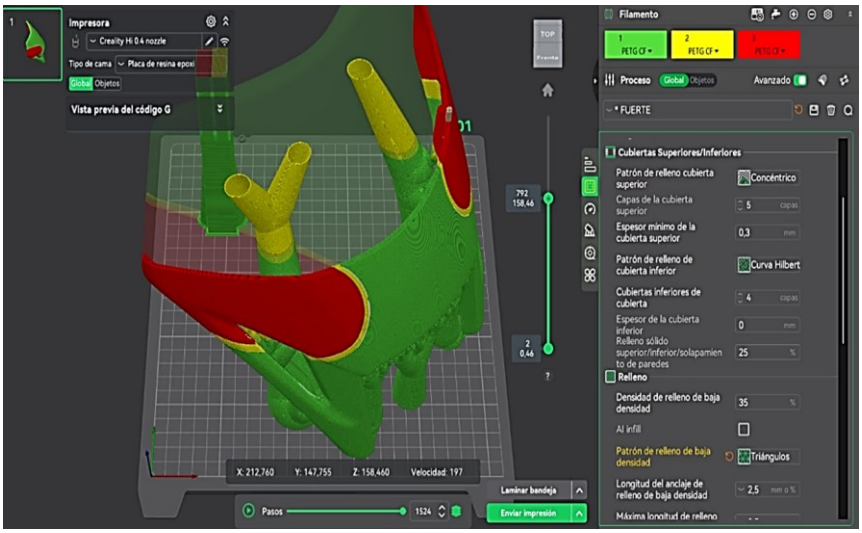
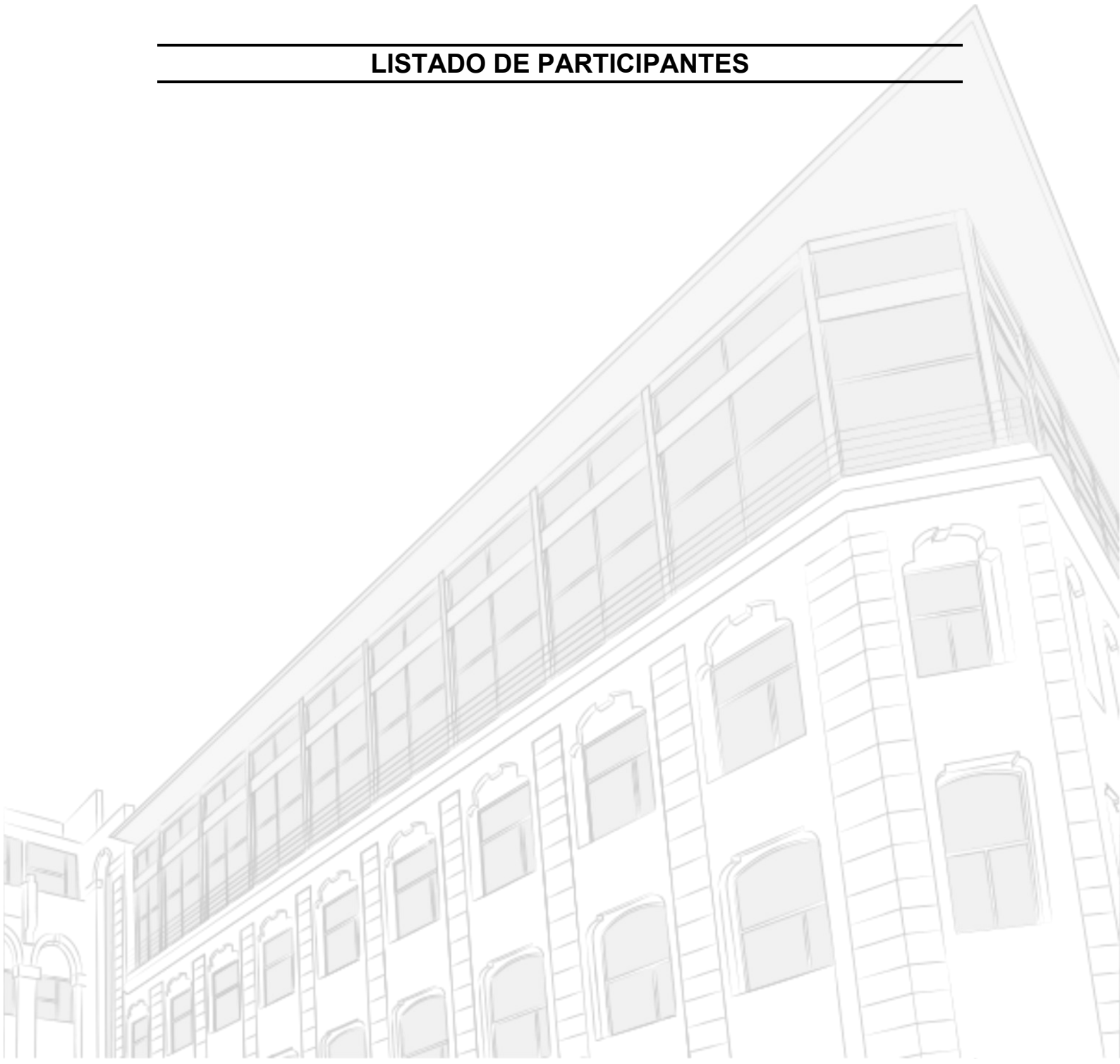



**Figura 4.** Parametrización para impresión 3D

El avance hasta la fabricación del prototipo evidencia la viabilidad de aplicar la fabricación aditiva FFF a autopartes descontinuadas o de difícil importación. Los resultados demuestran que el refuerzo localizado puede mejorar la relación desempeño-peso-costo, evitando el uso innecesario de materiales compuestos en toda la geometría.

# LISTADO DE PARTICIPANTES



# LISTADO DE PARTICIPANTES


Ainhoa Sánchez Martínez ..... 3
Aitana Francés Falip ..... 371
Alba Loriente Luján ..... 85
Alejandro De La Calle Salas ..... 169
Alejandro Inza Fitó ..... 253
Alejandro Rodríguez Blasco ..... 175
Alexandra Llidó Barragán ..... 433
Alexis Lopez Borrell ..... 19,145
Alfonso Martinez-Felipe ..... 19
Alfonso Muñoz ..... 409
Ali Waqas ..... 313, 565
Alicia Cordero ..... 445 451
Alicia Romero ..... 193, 529
Álvaro Alemany ..... 523
Ana Athenea Tejedor García ..... 377
Ana Ibáñez García ..... 427
Ana Isabel Sánchez Galdón ..... 307
Ana María Amat Payá ..... 347
Ana Mengual-Recuerda ..... 289, 337, 341
Anca Draguici ..... 25
Andrea Corina Vidurrizaga Hassinger ..... 439
Andreea Fota ..... 341
Andrés Camacho García ..... 499
Andrés Cremades Botella ..... 253
Andrés Felipe Yumayusa Castro ..... 175
Angel A. Juan ..... 253, 365
Angel Balaguer ..... 43
Angel Peiró Signes ..... 157,353
Anja Bubik ..... 25
Antonia Ferrer Sapena ..... 421, 547
Antonio Arqués Sanz ..... 347
Antonio J. Martínez Lengua ..... 547
Antonio Martínez Lengua ..... 421
Antonio Molina Picó ..... 313, 565
Aritz Unamuno Garay ..... 427, 433
Asunción Martínez García ..... 427
Beatriz Andres ..... 341
Beatriz Eixerés Tomás ..... 553
Belén Ferrer Ribera ..... 377
Bernardo Antonio Oliver Borrachero ..... 163, 535
Blanca Natividad Pérez Aguilar ..... 241
Blanca Pérez-Aguilar ..... 211
Bruno Marco ..... 193, 523, 529
Bàrbara Micó Vicent ..... 181, 247, 259, 331, 541, 577
Camilo Vera ..... 127
Carlos Aliaga Torró ..... 73
Carlos Lázaro Hernandez ..... 121, 493
Carlos Mauricio Sánchez Alvarracín ..... 283
Carlos Pascual ..... 193, 523, 529
Carolina Rosario Blanes Nadal ..... 265
Celia M. Rueda Navarro ..... 377
Cesar Carvallo ..... 301
Christian Beleña Postigo ..... 13
Christian Mauricio Cobos Maldonado ..... 283
Concha Silvestre ..... 187

Desde el análisis técnico y económico, el principal aporte de este proyecto consiste en la reducción del consumo de materiales de alto desempeño y en la alternativa de fabricación de repuestos bajo demanda mediante esta tecnología especialmente relevante para el Ecuador, donde el tiempo de importación, altos costos arancelarios y logísticos, baja rotación comercial y una gran discontinuidad de modelos de vehículos limitan la disponibilidad de autopartes, con esta estrategia se logra un gran aporte para la reducción en la dependencia de cadenas internacionales de suministro.

## CONCLUSIONES

La ingeniería concurrente y el empleo de herramientas de ingeniería inversa con escaneo 3D, reconstrucción CAD y análisis por elementos finitos permiten identificar las zonas críticas de la autoparte en la etapa de diseño, lo que fundamenta técnicamente la asignación d

iferenciada de materiales.

El uso de Kevlar-ABS combinado con PETG en las zonas críticas y de PETG en las regiones de menor solicitación optimiza la relación entre el desempeño y el comportamiento mecánico de la pieza, el peso, el costo y el consumo de material.

La identificación de zonas críticas equivalentes al 17 %–20 % del volumen total demuestra que no es necesario fabricar toda la autoparte con material compuesto de alto costo, sino únicamente reforzar de manera eficiente las regiones de mayor demanda estructural.

Con el análisis de elementos finitos se determina que la carcasa original fabricada en ABS alcanza un esfuerzo máximo de 26.739 MPa, un valor cercano a su límite de fluencia promedio de 30 a 45 MPa en condiciones de impacto.

El empleo de materiales alternativos, específicamente PETG con refuerzo localizado en Kevlar/ABS, redujo el esfuerzo máximo a 7.0051 MPa, lo que representa una disminución significativa de aproximadamente 73% y mejora notablemente el comportamiento estructural del componente.

## REFERENCIAS

[1] J. G. Portilla-Jiménez, “Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos,” *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 13, no. 1, pp. 38–47, Feb. 2022, doi: 10.29166/revfig.v13i1.3364.

[2] B. Sauza-Avila, Ma. E. Aguirre-Márquez, C. B. Lechuga-Canto, S. S. Pérez-Castañeda, D. Cruz-Ramírez, and M. T. Lugardo-Bravo, “Análisis de costo de materiales en una industria automotriz,” *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 10, no. 19, pp. 17–23, Jan. 2023, doi: 10.29057/escs.v10i19.9741

[3] M. Granja-Chiriboga, M. Gallegos-Vargas, R. Carrión-Aguilar, and F. Hablich-Sanchez, “Incidencia de los tributos por comercio exterior en las finanzas de Ecuador periodo 2019-2023,” *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 9, no. 4, pp. 817–831, Jul. 2024, doi: 10.33386/593dp.2024.4.2553.

[4] A. Cantini, L. Leoni, S. Ferraro, and F. De Carlo, “Centralized and decentralized supply chains: Performance maps for comparing the cost-effectiveness of distribution network configurations,” *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, vol. 204, p. 104435, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.tre.2025.104435.

Constantin Popescu ..... 409
Cristina Calabuig ..... 517
Cristina Guillem Moral ..... 103, 571
Cristina Mira Cuenca ..... 181, 331
Cristina Pavón ..... 433, 511
Cristina Molina ..... 193, 529
Dana Perniu ..... 25
Daniel Errandonea ..... 409
Daniel García García ..... 229, 493
Daniel López Rodríguez ..... 181, 235, 247, 253, 259, 331, 487, 499, 543, 559, 577
David Barrera Juca ..... 205, 229
David García Sanoguera ..... 121, 415
David Juárez Varón ..... 109, 341
David Veloso Castelló ..... 61
Denis Cianconi ..... 55
Diego Deiros ..... 43
Elena Cristina Rada ..... 25
Elena Herrero ..... 517
Elena Pinilla Cienfuegos, ..... 295
Elena Pérez Bernabeu ..... 37
Emma Perez ..... 193, 529
Enrique José Sanchis Pacheco ..... 319, 325
Enrique Navarro Ponce ..... 307
Esther Mondéjar Verdú ..... 175
Eva Bou Belda ..... 571
Eva G. Villalba ..... 91
Fabricio Calderón ..... 475,511
Fernanda Peset ..... 421, 547
Fernando Galera Perez ..... 427
Francisco de Paula Cerdá Leal ..... 79, 551
Francisco I. Chicharro ..... 91, 389
Francisco José Parres García ..... 169
Francisco Salas Molina ..... 37
Gaspar Mora ..... 43
Georgina Sebastiá Blanes ..... 295
Gianni Gallello ..... 139
Gómez Palacios, César ..... 353
Harrison de la Rosa Ramirez ..... 475, 511
Hermenegildo García Baldoví ..... 377
Ignacio Jordá Mora ..... 365
Ignacio Lara Jornet ..... 223, 271, 463
Ignacio Monllor Carbonell ..... 571
Inmaculada Climent Fuentes ..... 163, 169
Irene Boronat Castellar ..... 145, 383
Isabel Ferri-Molla ..... 49
Isabel Martón Lluch ..... 307
Ivan Dominguez-Candela ..... 19
J.Ernesto Solanes Galbis ..... 371
J.M. Ferri ..... 97
Jaime Lora García ..... 151
Jaume Gomez-Caturla ..... 205, 415
Javier Marco-Gimeno ..... 301
Javier Pascual ..... 187
Javier Silvestre Blanes ..... 115
Jennyfer Amado Bermúdez ..... 127
Jesús Yagüe ..... 523
Joaquin José Taverner Aparicio ..... 73

Joaquín de la Morena Borja ..... 319, 325
Joaquín Jiménez-Puerto ..... 139, 211, 241
John A. Taborda Giraldo ..... 547
Jordi Linares Carrasquer ..... 73
Jordi Linares-Pellicer ..... 49
Jordi Silvestre ..... 205, 277
Jordi Virgili Gomà ..... 359
Jorge Igual García ..... 499
Jorge Israel Peñafiel Alvarado ..... 217
Jorge Jordán Nuñez ..... 181, 247, 259, 331, 395,541, 561
Jorge Peñafiel Alvarado ..... 277
Jorge Zafrilla Muñoz ..... 115
Jose Miguerl Ferri Azor ..... 19
Josué Ferri Pascual ..... 499
José Andrés Lalangui Gallegos ..... 325
José Da Silva ..... 301
José Mengual Vaño ..... 223, 271, 463
José Vicente Pastor ..... 301
Juan Camilo Serna-Zuluaga ..... 127
Juan Carlos García Díaz ..... 61, 157
Juan Ivorra Martínez ..... 121, 415
Juan Jesús Izquierdo Domenech ..... 73
Juan López Martínez ..... 433, 511
Juan R. Torregrosa ..... 4435 451
Juan Seguí Moreno ..... 313, 565
Judith Boronat Soler ..... 475
Julio Esteban Rivero Jordá ..... 79, 163
Julissa Hermelinda Jerezano Ulloa ..... 389
Karen Stefanny Leon Pabon ..... 127
Laura Francés Soriano ..... 347
Laura Mercadé Morales ..... 295
Laura Tatiana Luna Briñez ..... 133
Lina E. Valencia ..... 337
Lourdes Sánchez Nacher ..... 277, 415
Lucía Agud Albesa ..... 235, 487
Luis Jesus Quiles Carrillo ..... 277, 469
M. del Puig Vicente-Vinas ..... 229, 469
Macarena Boix García ..... 487
Maira Alejandra Moreno Domínguez ..... 133
Manuel gomez morales ..... 67
Marc Martí Sabaté ..... 253
Maria Blanes Company ..... 193
Maria Fernanda López Pérez ..... 145, 151
Maria José Gaviria ..... 109
Maria-Fernanda López-Pérez ..... 97
Marilés Bonet Aracil ..... 517
Mario Miranda-Pinzon ..... 469
Mario Nicolás Miranda Pinzón ..... 493
Mario Sanjuan-Canto ..... 49
Marival Segarra Oña ..... 157
Marlon Jared Ospina Ochoa ..... 109
Marta Fabra Regalado ..... 247, 259, 541, 559
María Alfonso Molina ..... 211, 241
María Blances Company ..... 529, 571
María Dolores Samper ..... 427
María F. Cuenca Lozano ..... 199
María Jesús García-Campo ..... 577

María Juliana Guitiérrez Zuñiga ..... 175
María Pérez Ripoll ..... 481
Maya Torregrosa Sánchez ..... 97, 151
Melanie Esther Pedraza León ..... 289
Miguel Ángel Peydró Rasero ..... 79
Miguel Ángel Sellés Cantó ..... 535
Miguel-Jorge Reig-Valor ..... 97
Mirko Kunowsky ..... 31
Neus Garrido ..... 91, 235, 365, 389, 451
Nieves de Montserrat García Botella ..... 403
Néstor Montañés Muñoz ..... 229, 469
Óscar Calvo ..... 525
Octavio Ángel Fenollar Gimeno ..... 121, 217
Oscar Trull ..... 139, 157, 353
Paula Triguero Navarro ..... 451
Pedro Fernández de Córdoba ..... 421
Pedro José Fernández de Córdoba Castellá ..... 549
Pedro Piqueras Cabrera ..... 319, 325
Rafael Antonio Balart Gimeno ..... 217
Rafael Balart ..... 205
Rafael Gómez Volpe ..... 37
Rafaela Morales Morales ..... 505
Ramon Eduardo Guacaneme Pineda ..... 133
Raquel Macias Gonzàlez ..... 505
Raúl Llinares Llopis ..... 499
Raúl Navarro Martínez ..... 347
Rocio de la Torre ..... 337
Rosario Vilaplana ..... 409
Rubén Lledó Montava ..... 223, 271, 463
Sabela Otero Camaño ..... 247, 259, 541, 559
Salvador Cayetano Cardona Navarrete ..... 145, 151
Samuel Sánchez Caballero ..... 535
Sandra Oltra Crespo ..... 235
Santiago Ferrandiz ..... 25, 31, 283, 475
Sebastian Noriega Martinez ..... 319
Sebastián Salvador Martorell Alsina ..... 307
Seraphina Fortunato ..... 49
Sergi Montava Jorda ..... 163, 169
Sergio García Carrasco ..... 79, 553
Sergio Navalón Oltra ..... 377
Shirley Andrea Henao Galindo ..... 109, 289
Silvia Sempere Ripoll ..... 359
Simona Moldovan ..... 187
Sliman Almuhamed ..... 181, 331
Stephanie Ponce-Torres ..... 133
Tamara Aguilar ..... 31
Teodomiro Boronat Vitoria ..... 217, 493
Teresa Albero Albero ..... 115
Teresa Rutschi-De-Cea ..... 577
Vicent Fombuena Borràs ..... 19
Vicent Moltó Gallego ..... 457
Vicente Jover Peris ..... 395
Víctor Domingo Arlandis ..... 535, 553
Víctor Herráez Aparicio ..... 523, 571
Diana Belén Peralta Zurita ..... 585

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

UPV

CAMPUS D'ALCOI

