





Manual de restauración de dunas costeras








GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE

FICHA TÉCNICA

Dirección Técnica:
José Luis Tejerina Hernando (Demarcación de Costas de Cantabria. Ministerio de Medio Ambiente)
José Luis Ramírez Caro (Dirección General de Costas. Ministerio de Medio Ambiente)

Coordinación de contenidos:
Raúl Medina Santamaría (Universidad de Cantabria)

Autores:
Carlos Ley Vega de Seoane (Ecología Litoral)
Juan B. Gallego Fernández (Universidad de Sevilla)
César Vidal Pascual (Universidad de Cantabria)

Coordinación de edición:
Paola Lobato Gómez (IH Cantabria)

Revisión técnica:
Pablo Hermida Testa (IH Cantabria)
Beatriz Redondo Floriano (IH Cantabria)

Diseño y maquetación:
PROYECTAE Comunicación y Desarrollo

Fotografía:
Carlos Ley Vega de Seoane y Juan B. Gallego Fernández.

Imprime: Artes Gráficas Quinzaños, S. L.

Edita: Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas
Fecha de edición: Septiembre, 2007.
NIPO: 310-07-082-1
ISBN-13: 978-84-8320-409-2

Precio (IVA incluido): 30 €.

Impreso en papel Cyclus Print 100% reciclado.



Manual de restauración de dunas costeras



Índice

PRÓLOGO DIRECTOR GENERAL DE COSTAS, JOSÉ FERNÁNDEZ PÉREZ. 11
PRÓLOGO SUB. GRAL. PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LA COSTA, MIGUEL VELASCO CABEZA. 14

1. INTRODUCCIÓN 16

2. PROCESOS FÍSICOS
2.1. INTRODUCCIÓN 21
2.2. MORFODINÁMICA DE LAS PLAYAS 22
2.3. MORFOLOGÍA DE LAS DUNAS 33
2.4. PARÁMETROS SEDIMENTOLÓGICOS 54
2.5. EL TRANSPORTE EÓLICO 58

3. ECOLOGÍA
3.1. INTRODUCCIÓN 75
3.2. EL PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE UNA DUNA COSTERA 75
3.3. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DEL SISTEMA PLAYA-DUNA 77
3.4. ADAPTACIONES DE LAS ESPECIES DE PLANTAS 78
3.5. TIPOS FUNCIONALES DE PLANTAS FRENTE AL ESTRÉS AMBIENTAL COSTERO 84
3.6. ZONACIÓN DE VEGETACIÓN EN LOS SISTEMAS DUNARES COSTEROS 86
3.7. DESCRIPCIÓN DE LAS COMUNIDADES DE VEGETACIÓN DE LAS DUNAS COSTERAS 88
3.8. CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE ESPECIES Y COMUNIDADES 98
3.9. ESPECIES EXÓTICAS 105

4. USOS E IMPACTOS
4.1. INTRODUCCIÓN 111
4.2. IMPACTO DE LOS SISTEMAS DUNARES 112

5. DIAGNÓSTICO
5.1. INTRODUCCIÓN 121
5.2. VULNERABILIDAD DEL SISTEMA DUNAR 122

6. TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN
6.1. INTRODUCCIÓN 137
6.2. RECONSTRUCCIÓN MORFOLÓGICA DE LA DUNA COSTERA 139
6.3. REVEGETACIÓN 149
6.4. ELIMINACIÓN DE LA VEGETACIÓN INVASORA 158
6.5. SISTEMAS DE PROTECCIÓN 159
6.6. SEGUIMIENTO DE LAS OBRAS DE RESTAURACIÓN 171
6.7. MANTENIMIENTO 174

7. MÉTODOS DE CULTIVO DE PLANTAS DUNARES
7.1. INTRODUCCIÓN 177
7.2. TIPOS DE REPRODUCCIÓN VEGETAL 178
7.3. ESPECIES UTILIZADAS EN LA RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS DUNARES 179
7.4. CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO DE PLANTAS DUNARES 181
7.5. PRODUCCIÓN DE BARRÓN 182
7.6. GRAMA MARINA 193
7.7. PRODUCCIÓN DE AZUCENA MARINA 194
7.8. PRODUCCIÓN DE OTRAS ESPECIES 195
7.9. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO 196
7.10. PROGRAMA DE PRODUCCIÓN 206

8. EJEMPLOS DE ACTUACIONES
8.1. EL ARENAL DE LIENCRES (CANTABRIA) 215
8.2. EL SALER (VALENCIA) 219
8.3. ENEBRALES (HUELVA) 223
8.4. EL ESPIGÓN (HUELVA) 227

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 232

ANEXO. RELACIÓN DE RECURSOS GRÁFICOS 244

Prólogos

José Fernández Pérez
Director General de Costas
Ministerio de Medio Ambiente

Miguel Velasco Cabeza
Sub. Gral. para la Sostenibilidad de la Costa
Dirección General de Costas
Ministerio de Medio Ambiente



Las dunas litorales son simplemente la continuación de las playas tierra adentro, es decir, constituyen la mayor parte de la zona emergida de las playas. Por esa razón la Ley de Costas incluye a las dunas en la propia definición de las playas como uno de los principales bienes característicos del dominio público marítimo-terrestre.

La función que las dunas ejercen en el territorio, en el modelado y en la configuración de la costa, es tanto o más importante aún que el atractivo plástico y paisajístico que encierran, y la característica biodiversidad que albergan.

Desde este punto de vista funcional, las dunas representan las reservas de arena de las playas, es decir, las zonas donde durante los episodios extremos, como los grandes temporales, los tsunamis, o las mareas excepcionales, el mar toma la arena y los materiales que necesita para que el perfil trasversal de la playa se acomode a las condiciones más duras de la energía incidente del oleaje.

Los cordones dunares y las flechas de arena son los elementos que regulan la hidrodinámica de los estuarios, marismas y lagunas litorales, y a los que éstos deben su existencia, su interés ambiental y su biodiversidad, de las más productivas de los ecosistemas existentes.

Este papel de las dunas y cordones litorales adquiere más importancia, más peso específico, ante los desafíos que ahora nos plantea los efectos del cambio climático, pues por un lado nos enfrenta a una subida del nivel medio del mar, y por otro, a una mayor frecuencia de los temporales más fuertes.

Todos sabemos que las playas son más estrechas tras los temporales, y más anchas cuando han estado expuestas un cierto tiempo a un oleaje más suave, y eso quiere decir que en el primer caso, la mayor parte de la arena de la playa está bajo el agua, y en el segundo, emergida, ofreciendo superficie en seco para los bañistas y usuarios de la playa.

Para asegurar la existencia de esa zona seca de la playa, que es la que utiliza directamente la ciudadanía que las frecuenta, la que constituye la "materia prima" de la industria turística, y uno de los espacios más productivos en las ciudades y urbanizaciones turísticas de la costa, es esencial disponer de las reservas de arena que las dunas representan.

Antes de la entrada en vigor de la Ley de Costas en 1988, aunque existían razones (jurídicas, y técnicas sin ninguna duda) para considerar las dunas como parte integrante de las playas, lo cierto es que, al no estar expresamente incluidas en la definición de los bienes de dominio público marítimo-terrestre por la Ley de Puertos de 1928 y la de Costas de 1969, casi todas las dunas de nuestro país quedaron fuera de los deslindes aprobados entonces, que se realizaron en muchas zonas costeras donde se empezaba a desarrollar el turismo.

Esto es lo que explica, al menos en parte, la masiva ocupación, y por tanto, la destrucción, de los cordones litorales en amplios tramos de la costa, y concretamente, en el litoral del arco valenciano y de la Costa del Sol.

Las consecuencias de este fenómeno han sido devastadoras. No sólo han disminuido de forma drástica las reservas de material de playa, que deben estar disponibles durante los episodios extremos, sino que la ocupación y destrucción de los cordones litorales impiden o dificultan la recuperación natural del perfil de playa tras los temporales.

En estos momentos resulta clave, pues, concentrar toda la atención en salvaguardar los sistemas dunares y cordones litorales, en asegurar su plena funcionalidad, fortaleciendo su capacidad ante los desafíos del cambio climático si es preciso, y en restaurar y recuperar aquellos que han desaparecido o han sido gravemente dañados, pues la existencia de las playas en un futuro muy próximo depende de ello.

El Ministerio de Medio Ambiente, a través de su Dirección General de Costas, lleva años dedicado a profundizar en el conocimiento de la función territorial de los sistemas dunares y cordones litorales, en los mecanismos de su dinámica, y en la comprensión de su biodiversidad, y ha acumulado una amplia experiencia práctica a través de numerosas intervenciones en los diversos campos de dunas que existen en las costas de nuestro país.

Este **"Manual de restauración de dunas costeras"** pretende ser una expresión del interés del Ministerio de Medio Ambiente por la conservación y restauración de las dunas, a lo que dedica una parte significativa y creciente del presupuesto de la Dirección General de Costas. Y al mismo tiempo, condensa la experiencia y el conocimiento acumulado durante muchos años en el trabajo sistemático en numerosos y muy diferentes sistemas dunares en toda la costa española, por lo que constituye un documento imprescindible para avanzar en este proceso de revalorización social, cultural, funcional y ambiental de estos valiosos e insustituibles espacios litorales.

La realización de este **"Manual de restauración de dunas costeras"** ha sido posible gracias al compromiso y la dedicación de un conjunto de funcionarios de la Dirección General de Costas que con la colaboración de especialistas de las Universidades de Sevilla y Cantabria y la empresa Ecología Litoral, llevan muchos años perfeccionando el conocimiento y las mejores prácticas de intervención sobre los sistemas dunares, de manera que este auténtico compendio sobre la materia es también un homenaje al esfuerzo y al trabajo creativo de todos ellos.

José Fernández Pérez
Director General de Costas
Ministerio de Medio Ambiente



La elevada presión y frecuentación humana unidas a determinados impactos naturales procedentes del oleaje, inundaciones de agua de mar, erosión o deposición de arenas, provocan que los sistemas dunares costeros de nuestro país estén expuestos a un conjunto de agresiones y a una perturbación tal que afectan de manera considerable a su conservación. Además, no podemos olvidarnos de las especies exóticas que, al naturalizarse, pueden alterar las características estructurales y funcionales de los ecosistemas naturales y seminaturales, convirtiéndose en especies invasoras. Esta adversa situación ha suscitado que desde el Ministerio de Medio Ambiente exista un gran interés por preservar, conservar y restaurar los sistemas dunares costeros existentes en el litoral español.

No inventamos nada si afirmamos que, en general, las actividades humanas sobre las dunas costeras han causado un extenso cambio ecológico y morfológico. Tanto su destrucción y fragmentación así como los procesos relacionados con su formación y mantenimiento, han conducido a la pérdida de un buen número de playas, dunas y humedales, desencadenando, asimismo, un incremento del número de especies de organismos amenazados.

En el interior de este manual queda patente que la degradación y desaparición de las dunas debido a la actividad humana es consecuencia, principalmente, de las actividades que el hombre desarrolla en la costa. Desde el uso residencial y recreativo hasta el ganadero y agrícola, afectando en todos los casos, en mayor o en menor medida, a las dunas costeras.

Como dato significativo, tal y como se indica en este manual, cabe destacar que las dunas costeras europeas representan actualmente un 75% del área existente hace un siglo. Hoy en día, alrededor de un 45% permanecen intactas de forma natural, cifra que en el Mediterráneo se reduce a un 25%. Una previsión a tener en cuenta es que la tasa de desaparición de dunas y playas en Europa está estimada para las últimas décadas en, aproximadamente, 30 ha/año. La situación en España tampoco es optimista. La proporción que corresponde a sistemas dunares de la Península Ibérica que requieren algún tipo de actuación es de un 80% del total, y tan sólo un 20% de ellos, se encuentra en buen estado.

Tras este rápido repaso del panorama actual y con estas perspectivas un tanto desalentadoras, nace el **"Manual de restauración de dunas costeras"**. Un manual que se plantea

como principal objetivo convertirse para el lector en una herramienta útil y una oportunidad de aumento del conocimiento científico, que, indudablemente, redundará en una mejor gestión de los sistemas dunares costeros de nuestro país. Este manual pone de manifiesto la necesidad de analizar aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos y ecológicos para establecer cuál es el estado actual de los ecosistemas dunares, especialmente a la hora de abordar cualquier tipo de actuación de gestión en un ecosistema determinado.

El **"Manual de restauración de dunas costeras"** aborda, a lo largo de nueve capítulos, las técnicas para su restauración, centrándose en su reconstrucción, revegetación, sistemas de protección, planes de comunicación y seguimiento de las actuaciones llevadas a cabo para tal fin. La relevancia de la función natural de los sistemas dunares costeros unida a la importancia de la vegetación dunar tanto en la fijación de las arenas como en el cambio de las características de superficie en relación al flujo del viento es tal que, sin su presencia, el litoral español cambiaría su perfil de manera drástica.

Miguel Velasco Cabeza
Sub. Gral. para la Sostenibilidad de la Costa
Dirección General de Costas
Ministerio de Medio Ambiente

1

Introducción

Las dunas costeras son ecosistemas terrestres únicos situados en la transición entre ambientes continentales y marinos. Como el resto de hábitats costeros, los sistemas dunares son extremadamente frágiles, ajustados en su formación, desarrollo y evolución a procesos naturales, y fácilmente vulnerables frente a la acción humana. Se distribuyen a nivel mundial en todo tipo de climas y en España presentan una amplia distribución tanto en la península como en las islas.

Las dunas costeras al igual que otros ecosistemas litorales han sido utilizados desde antiguo por el hombre con diferentes propósitos relacionados con la instalación de asentamientos y explotación de los recursos y oportunidades que estos ecosistemas ofrecen. Actualmente, al igual que ocurre en toda Europa, la mayor parte de los ecosistemas dunares se encuentran degradados debido a la presión humana o han sido destruidos, siendo la actividad urbanística y turística unas de las principales causas de alteración (European Environmental Agency, 2006).

En los últimos años, la sociedad está tomando conciencia de que la degradación de los ecosistemas naturales supone la pérdida, no sólo de un paisaje y los organismos que lo habitan (valores intrínsecos), sino también de los bienes y servicios que todos los elementos de ese ecosistema, sus relaciones y su funcionamiento suponen para el bienestar humano (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Entre los servicios que los sistemas dunares costeros prestan a la sociedad destaca, en primer lugar, la defensa frente a episodios catastróficos de invasión del agua de mar sobre intereses humanos, debido a huracanes, tormentas y maremotos, siendo de gran importancia también su capacidad de almacenar y depurar aguas contaminadas y el servir de almacén de arenas para la regeneración natural de playas y bajos arenosos productivos. Entre los servicios de tipo cultural no son desdeñables su valor estético, espiritual y sobre todo, el valor recreativo relacionado con el descanso de millones de personas anualmente. Las dunas costeras suponen un capital natural muy valioso que debe ser conservado. La desaparición y alteración progresiva de las dunas costeras implica una pérdida de estos bienes y servicios, que sólo pueden ser recuperados, al menos en parte, mediante costosos programas de restauración.

En España las dunas costeras son, en la mayor parte de su superficie, Dominio Público Marítimo Terrestre (Ley de Costas, 1988) y pertenecen al Estado. Es el Estado el encargado de velar por la protección, conservación y restauración de las dunas costeras. La restauración dunar comenzó en 1980 en Cantabria, pero es a partir de 1990 cuando la Dirección General de Costas acomete de forma seria los estudios y actuaciones tendentes a corregir la degradación

de los sistemas dunares (Ramírez Caro *et al.*, 1998). Desde entonces, las actuaciones han sido muchas, pero no suficientes, ni en número ni en la consecución de objetivos de restauración ecológica (Gallego Fernández *et al.*, 2003). Si bien el esfuerzo ha sido y es importante, la carencia, en ocasiones, de objetivos de gestión claros, resultado de la enorme cantidad de intereses que confluyen en el litoral, y la ausencia de métodos técnicos adecuadamente formulados, dificulta el éxito las actuaciones realizadas y comprometen las futuras. Resultado del interés de la Dirección General de Costas en la gestión de las dunas costeras ha sido la elaboración de este manual de restauración, dirigido principalmente a técnicos que desde la Administración del Estado y Autonomías intervienen en la gestión de las dunas costeras.

El objetivo de este Manual es dotar de la información que permita proponer las medidas técnicas necesarias para conseguir una restauración ecológica de las dunas costeras, mediante un proceso que facilite la recuperación del ecosistema degradado, dañado o destruido, cuya meta sea recuperar sus valores intrínsecos, elementos bióticos, abióticos y su funcionamiento y dinámica, en su contexto histórico y regional, y que permita la realización de prácticas culturales sostenibles (SER 2002). El Manual va dirigido, por tanto, a los técnicos y gestores que dedican su actividad a la gestión y restauración de los sistemas dunares.

El Manual, en primer lugar, trata de las principales características físicas (**Capitulo 2**) y ecológicas (**Capítulo 3**) de las dunas costeras, describiendo los elementos abióticos y bióticos que participan y los procesos dinámicos que contribuyen a la formación, desarrollo y mantenimiento. Estos dos capítulos introductorios pretenden poner al día a técnicos y profanos en lo que se conoce sobre el funcionamiento de los sistemas dunares costeros con objeto de abordar la restauración desde el conocimiento básico científico. El **Capítulo 4** muestra qué usos e impactos realiza el hombre en dunas costeras, mostrando un particular interés en la identificación de impactos resultados de las actividades recreativas que se realizan en las dunas. El **Capítulo 5** propone un método de evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas dunares costeros como herramienta diagnóstica para establecer su grado de alteración, se analizan aspectos geomorfológicos, ecológicos y de actividad humana. Los **Capítulos 6 y 7** presentan y describen métodos para la restauración dunar. El primero de ellos afronta las técnicas utilizadas para la construcción de la topografía dunar, revegetación, protección, divulgación y seguimiento; y el segundo, se dedica a explicar los métodos de obtención de plantas dunares en vivero para la revegetación. En el **Capítulo 8** se presentan diversos ejemplos de restauración dunar realizados en España: Dunas de Liencres en Cantabria, Enebrales y Espigón en Huelva y El Saler en Valencia. Finalmente, el **Capítulo 9** recoge todas las referencias bibliográficas utilizadas en el Manual.

2

Procesos físicos



2.1

Introducción

Los sistemas dunares costeros son acumulaciones sedimentarias arenosas que se sitúan en áreas próximas a ambientes intermedios suministradores de sedimento, también arenosos o mixtos, de los que dependen estrechamente. Los campos dunares más comunes se encuentran adosados a áreas de posplaya, si bien antiguos depósitos arenosos eólicos pueden estar desconectados actualmente de su área fuente debido a cambios eustáticos o epirogenéticos.

El establecimiento del balance sedimentario de una playa es fundamental desde el punto de vista del desarrollo de los sistemas dunares costeros, puesto que permiten determinar si el sistema es regresivo, está en equilibrio o es progradante.

La playa y la zona de rompientes conforman un ecosistema marino discreto que contiene productores primarios, consumidores y descomponedores, con contornos bien determinados por la playa y los sistemas circulatorios de la zona de rompientes. El campo de dunas conforma asimismo un ecosistema terrestre discreto con contornos formados por los límites marino y terrestre del transporte eólico y que, al igual que el ecosistema marino contiene una flora y fauna características.

El ecosistema de playa/zona de rompientes está controlado por el oleaje que remueve y transporta la arena, acumula el fitoplancton, bombea agua y materia orgánica en el sistema intersticial y mueve a los animales. Por otro lado, el viento es el motor de la dinámica del campo de dunas, transportando la arena, el aerosol salino y los detritos y enterrando la vegetación.

Para poder realizar una gestión adecuada de los sistemas dunares es necesario poseer el conocimiento adecuado de los procesos que acontecen en los mismos y de los efectos que las actuaciones humanas tienen sobre su morfología y estabilidad.

En este capítulo se estudiarán en primer lugar la morfología y los procesos físicos que afectan a las playas como parte del sistema playa-duna asociada. En segundo lugar, se describen los distintos tipos morfológicos de dunas que se pueden encontrar en las costas españolas así como los factores que afectan a dicha morfología. En tercer lugar, se describen los materiales implicados en los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Y finalmente, se describen los procesos físicos implicados en la deflación, transporte y sedimentación de los granos de arena.

2.2 Morfodinámica de las playas

2.2.1. Introducción

Las playas sufren cambios topobatimétricos bajo la acción del oleaje, corrientes y viento. Los modelos de evolución de playas integran todas o algunas de estas dinámicas con el objetivo de predecir su evolución.

El modelado del flujo en la zona de rompientes y de la interacción flujo-sedimento para el establecimiento de los modelos de transporte, sólo se puede realizar imponiendo numerosas simplificaciones. Como resultado, aún en el supuesto de que las acciones sean conocidas, no existe ningún modelo de evolución tridimensional de playas que sea capaz de predecir las variaciones a corto y medio plazo en el tiempo y de pequeña y media escala en el espacio. Por otro lado, es necesario tener en cuenta la naturaleza aleatoria de las acciones. Cualquier modelo de evolución de playas tiene que tener en cuenta esta aleatoriedad, mediante el adecuado tratamiento estadístico de las variables de entrada y de los resultados.

En este apartado se presenta, la definición de algunos términos, conceptos, procesos y modelos involucrados en la descripción de la morfodinámica de playas.

2.2.2. La morfología de las playas

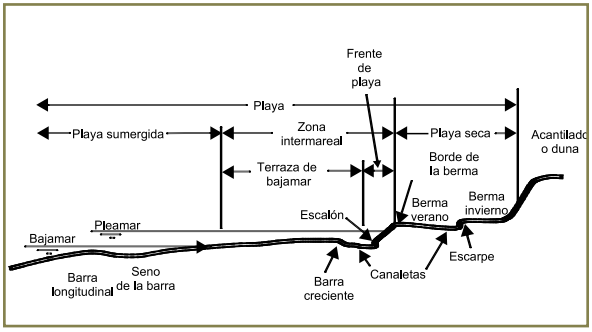


Figura 2.2.1. Zonación y elementos del perfil de playa.

En esta descripción se separa la definición de las formas en el perfil de playa de las formas características en planta. Cuando la variación longitudinal de las características morfológicas de una playa es muy pequeña, se podrá asumir que la playa es bidimensional y podrá ser descrita por las características de su perfil. En el caso general de que las variaciones longitudinales sean importantes, la playa será tridimensional y se requerirá un número determinado de perfiles y su definición en planta para la descripción morfológica completa de la playa.

Tabla 2.2.1. Definiciones sobre la morfología del perfil.

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Perfil de playa	Variación de la profundidad con la distancia a la línea de costa, en dirección normal a la misma.
Línea de costa	Línea determinada por el nivel de la pleamar.
Playa seca	Zona del perfil de playa comprendida entre el límite de tierra de la playa y el nivel alcanzado por el oleaje en pleamar. Este segundo límite suele coincidir con el borde de la berma o el inicio del frente de playa.
Berma	Zona semi-horizontal de la playa seca formada por la acumulación de sedimento debida al oleaje. Su límite por el lado del mar es el brusco cambio de pendiente que se produce hacia el frente de playa, denominado borde de la berma. Cuando, tras una temporada de gran actividad del oleaje, se sucede un período de calma, una nueva berma, berma de verano se puede añadir a la anterior, berma de invierno, con un nivel horizontal inferior (debido a que el ascenso del oleaje es inferior). Marcando la separación entre las dos bermas puede haber una zona de mayor pendiente, correspondiente al frente de playa de invierno.
Escarpe	Escalón vertical en la playa seca formado por la erosión de la berma producida por un temporal.
Zona intermareal	Zona de la playa comprendida entre el borde de la berma y el la línea de máxima bajamar.
Frente de playa	Sección de la playa que queda expuesta a la acción del flujo ascendente y descendente del oleaje en pleamar.
Escalón	Zona de mayor pendiente que aparece en ocasiones en el límite inferior del frente de playa en playas reflejantes durante la pleamar.
Terraza de bajamar	Parte de la zona intermareal situada entre el límite inferior del frente de playa y la línea de máxima bajamar.
Canaleta de bajamar	Depresión en la terraza de bajamar que puede aparecer inmediatamente por debajo del frente de playa. Suele estar asociada al seno de una barra creciente muy próxima al frente de playa.
Barra longitudinal	Acumulación de arena semi-paralela a la línea de costa. Puede haber varias barras en el perfil de la playa.
Cresta de la barra	Zona de mayor elevación de la barra longitudinal.
Seno de la barra	Depresión en el perfil de playa paralela a la línea de costa, asociada con la barra. Se produce inmediatamente hacia el interior de la barra.
Playa sumergida	Zona de la playa comprendida entre la línea de máxima bajamar y el límite exterior del perfil.

Se define **Playa** como la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje.

Las playas se enmarcan dentro de la **Zona Costera**, que comprende el área de la plataforma continental y de la costa en la que los procesos morfodinámicos vienen determinados por la dinámica marina. Su desarrollo hacia tierra y hacia el mar depende, por lo tanto, de la tipología de la costa, de la plataforma continental, y del clima marítimo de la zona.

2.2.2.1. El perfil de las playas

Definiciones

Las definiciones relativas al perfil están basadas en la figura 2.2.1 y se resumen en la tabla 2.2.1.

Variaciones del perfil: Playas disipativas y reflejantes

El perfil de las playas cambia constantemente como respuesta a los cambios del transporte transversal de sedimentos que produce la dinámica marina, especialmente el oleaje. Los cambios más notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras y al avance o retroceso de la berma. De entre las múltiples formas posibles de perfil, existen dos extremas que presentan una geometría en planta aproximadamente bidimensional: el perfil disipativo y el reflejante.

El **perfil disipativo**, (ver Figura 2.2.2), es característico de playas de arena fina y/o niveles de energía elevados, (ver Foto 2.2.1). En general, la berma no es aparente y el perfil se inicia prácticamente en el pie de duna o en el acantilado, en su caso. La zona de rompientes es muy amplia y tiene un talud ligeramente cóncavo con pendientes bajas y sin formaciones destacables. El perfil bajo la bajamar suele presentar una o varias barras longitudinales, con senos y crestas poco marcados. La pendiente de la zona de asomeramiento es mayor que la de la zona rompientes.

El **perfil reflejante**, (ver Figura 2.2.3), se presenta en playas de arenas medias a gruesas, con niveles de energía bajos. En este caso, el borde de la berma marca claramente el inicio del frente de playa. En la playa seca pueden apreciarse restos de bermas y escarpes correspondientes a perfiles más retrasados producidos por condiciones de oleaje más energéticas. Sobre el frente de playa son frecuentes los beach cusps (ver foto 2.2.2) y suele existir un escalón en la parte inferior del frente de playa compuesto de materiales más gruesos, después del cual la pendiente del perfil baja considerablemente, conservando una forma cóncava. Una plataforma de bajamar de pendiente suave queda al descubierto en bajamar. En la playa sumergida no se aprecian barras.

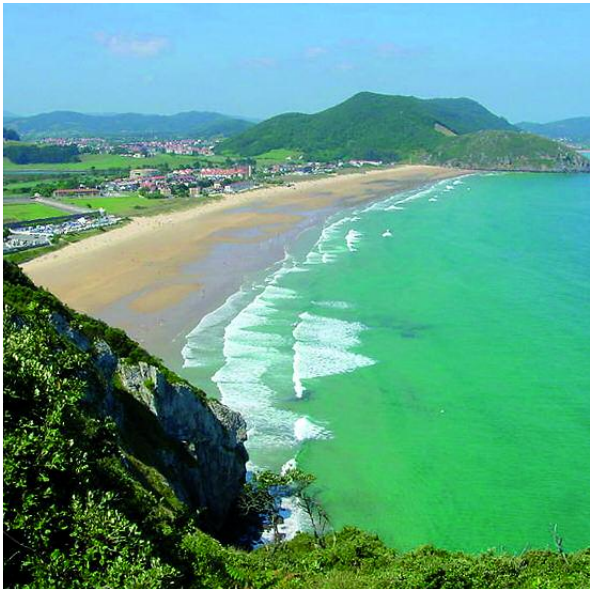


Foto 2.2.1. Playa disipativa: Playa de Berria (Cantabria).



Foto 2.2.2. Beach cusps y rotura del oleaje en una playa reflejante en pleamar.

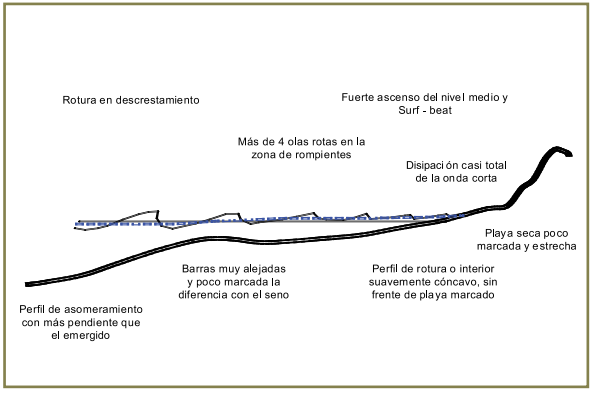


Figura 2.2.2. El perfil disipativo.

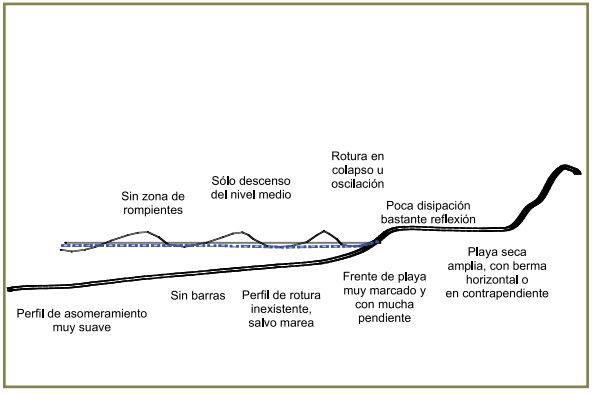


Figura 2.2.3. El perfil reflejante.

Entre estos dos tipos extremos de morfología del perfil se presenta toda una gama de estados intermedios. Estos estados de playa no se pueden definir mediante un sólo perfil, pues son básicamente tridimensionales y la morfología está fuertemente relacionada con los sistemas circulatorios que se establecen en las playas.

Algunas playas muestran una gran variabilidad en su perfil, respondiendo a condiciones de oleaje fuertemente variables. En latitudes templadas, las playas medianamente expuestas, con tamaños de grano fino a medio, de 0.2 a 0.3 mm de diámetro, sufren condiciones de oleaje caracterizadas por fuertes variaciones estacionales y fuertes temporales invernales. Tras un período de tiempo sometidas a temporales de forma repetitiva, dichas playas alcanzan una posición de semiequilibrio que se aproxima bastante a la de las playas disipativas, y se dice que la playa ha alcanzado su **Perfil de invierno**. Contrariamente, tras largos períodos de calma, más frecuentes en los meses estivales, la playa recupera un perfil cercano al reflejante**, Perfil de verano**. Estos términos de 'perfil de invierno' y 'perfil de verano', son pues relativos y pueden no corresponderse, en un momento determinado con la estación del año en la que se encuentra el citado perfil, sino con el aspecto que presenta la playa en un momento determinado.

2.2.2.2. La forma en planta de las playas

Además de la definición del perfil, la forma de una playa no queda completa sin su descripción en planta que se realiza en función de las escalas de las mismas en las figuras 2.2.4 y 2.2.5 y en la tabla 2.2.2.

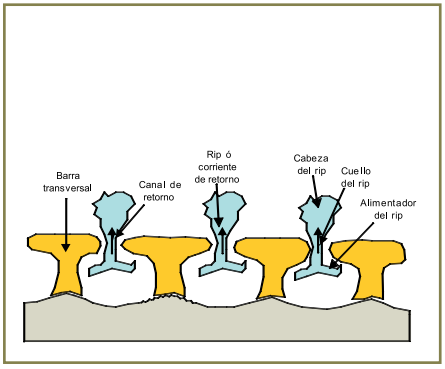


Figura 2.2.4. Formas en planta de escala media.

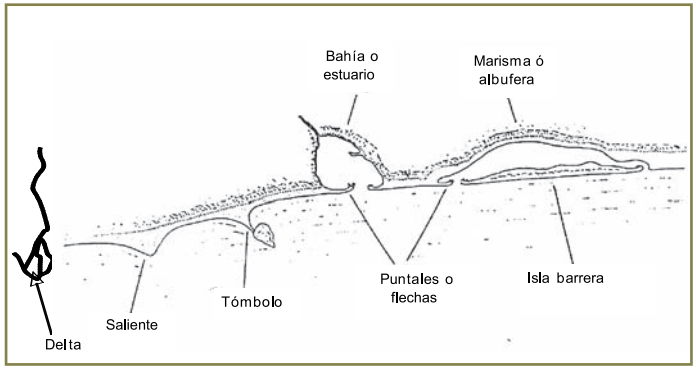


Figura 2.2.5. Formas en la planta de gran escala.

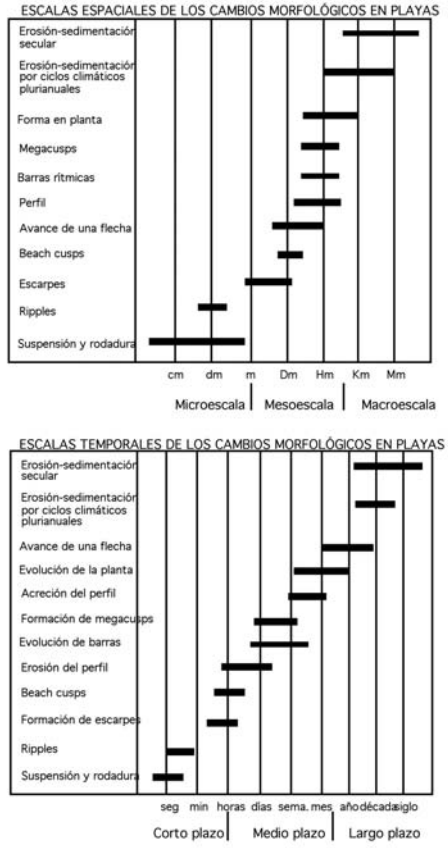
Tabla 2.2.2. Formas en planta de las playas.

ESCALA	FORMA	DESCRIPCIÓN
PEQUEÑA ESCALA (formas de lecho)	**Rizaduras o ripples**	Rizaduras del lecho producidas por el movimiento oscilatorio o las corrientes, con escala de longitud de decímetros y de tiempo de formación de segundos.
	Dunas y antidunas	Formas de lecho asociadas al oleaje y corrientes en la zona de rompientes, con escalas de longitud del orden de metros y de tiempo, de minutos.
MEDIA ESCALA Figura 2.2.4	**Beach cusps**	Formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, con longitud de onda del orden de la decena de metros. Escala de evolución: horas.
	Megacusps	Formas rítmicas de entrantes y salientes que se forman en el frente de playa, asociadas a secuencias longitudinales rítmicas de barras crecientes o transversales. Los entrantes en el frente de playa suelen estar enfrentados con los canales de retorno, mientras que los salientes coinciden con la zona de avance hacia tierra de la barra. Su longitud de onda es del orden de la centena de metros. Escala de evolución: meses.
	Barras rítmicas	Barra creciente que alterna zonas de mayor aproximación a tierra con otras más alejadas. Estas barras son características de algunas playas intermedias y siempre están asociadas con megacusps en el frente de playa. Mismas escalas que megacups.
	Barras crecientes	Barras claramente asimétricas, con el talud del lado de tierra con mucha más pendiente, que del lado del mar, indicando un desplazamiento de la barra hacia tierra. Mismas escalas que megacusps.
	Barras transversales	Barras que se extienden en dirección aproximadamente perpendicular a la línea de costa. Frecuentemente su lado de tierra queda unido al frente de playa. Entre las barras transversales existen siempre canales de retorno. Mismas escalas que megacusps.
	Canales de retorno	Zonas de mayor profundidad que cortan transversalmente las barras longitudinales y crecientes. Están asociados a la hidrodinámica de las corrientes en la zona de rompientes. Mismas escalas que megacusps.
GRAN ESCALA Figura 2.2.5	**Deltas**	Depósito arenoso de forma más o menos triangular, resultante de la interacción entre el sedimento aportado por un río y el transporte longitudinal generado por el oleaje.
	Tómbolos	Saliente de arena producido por la presencia de una isla, arrecife emergido natural o estructura artificial, debido al cambio de la dinámica del oleaje provocado por la estructura. En el tómbolo, el saliente de arena se une a la estructura, formando un espigón natural de arena entre la costa y la isla o estructura.
	Salientes o hemitómbolos	Saliente de arena con el mismo origen del tómbolo o debido al encuentro de dos corrientes costeras opuestas. En el caso de estar producido por una estructura, el saliente no alcanza la misma.
	Cordones litorales puntales o flechas	Cordón arenoso paralelo a la dirección general de la línea de costa, producido por los cambios de dirección de la misma, en zonas con importante transporte longitudinal de sedimentos. En determinadas costas de plataforma somera, los cordones litorales pueden surgir por transporte transversal del sedimento. Cuando el cordón tiende a cerrar una bahía en zonas mareales o con aportación fluvial importante, el cordón alcanza un equilibrio con el prisma de marea o con el caudal fluvial. En zonas sin marea, o con poca aportación fluvial, el cordón puede llegar a cerrarse casi completamente, dejando en la zona de tierra una laguna salobre o dulce denominada albufera.
	Islas barrera	Si un cordón litoral queda separado por dos salidas al mar de la marisma interior, se denomina isla barrera.

2.2.3. Escalas espacio - temporales de los procesos morfodinámicos

Las dinámicas actuantes sobre la playa movilizan los sedimentos y modifican la forma de la misma. Estas dinámicas (oleaje, corrientes, variaciones del nivel medio, aportaciones fluviales, etc…) y los cambios de forma producidos son clasificables en determinadas escalas de espacio y tiempo. De esta manera, los modelos desarrollados para el estudio de la hidrodinámica, procesos de transporte y cambios de forma, suelen ser válidos en escalas acotadas en un rango espacio-temporal determinado.

Tabla 2.2.3. Escalas espaciales y temporales típicas de algunos cambios morfológicos de las playas.



Las escalas espaciales y temporales de los procesos que actúan en una playa están relativamente ligadas, por lo que podrían ser definidas conjuntamente. Sin embargo, en el diseño de las campañas de seguimiento, tiene una gran importancia la definición independiente de las medidas tanto en el espacio como en el tiempo.

En la tabla 2.2.3 se presentan las escalas espacio-temporales de algunos de los cambios morfológicos más importantes que tienen lugar en las playas. Estos cambios se han dividido en corto, medio y largo plazo o pequeña, media y gran escala, de una manera arbitraria.

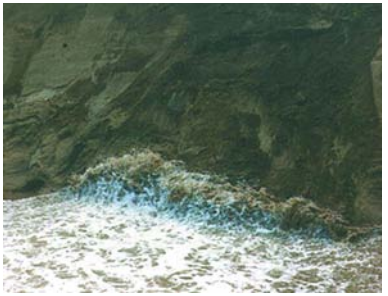


Foto 2.2.3. Erosión de pie de duna en un campo dunar en retroceso. Somo (Cantabria).

2.2.4. El balance sedimentario en las playas

El establecimiento del balance sedimentario de una playa es fundamental desde el punto de vista del desarrollo de los sistemas dunares costeros, puesto que permiten determinar si el sistema es regresivo, está en equilibrio o es progradante. En el primer caso, el sistema dunar se verá sometido a retroceso, con una erosión progresiva de la duna primaria durante los temporales y mareas vivas, no recuperada en los períodos de buen tiempo (ver foto 2.2.3). La duna primaria mostrará, de esta manera, fuertes pendientes del lado del mar, con derrumbes frecuentes, apareciendo en el pie de la misma bloques de vegetación arrancados de la duna.

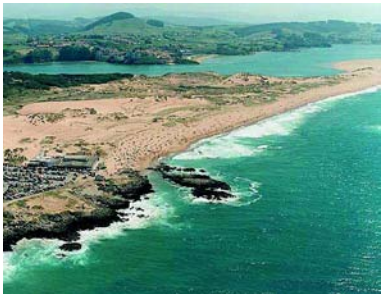


Foto 2.2.4. Campo dunar en equilibrio. Liencres (Cantabria).

En el segundo caso, se mantendrá una playa seca con un transporte eólico hacia las dunas compensado por períodos de erosión en temporales (ver foto 2.2.4). Durante los períodos de buen tiempo, suele formarse una anteduna con vegetación incipiente, la cual se destruye en los períodos erosivos. La duna primaria, en estos casos, suele estar bien desarrollada, con una altura elevada.

Finalmente, en el caso de balance sedimentario positivo, la continua aportación de sedimento a la playa seca combinado con el transporte eólico en la misma, va produciendo cordones paralelos de antedunas a medida que una nueva anteduna se añade del lado del mar (ver foto 2.2.5). Las dunas, en este caso, suelen ser de baja altura, progresivamente más vegetadas a medida que se avanza hacia el interior.



Foto 2.2.5. Campo dunar progradante. Espigón de Huelva.

El balance sedimentario es un cómputo, en términos de macro escala, de los aportes y pérdidas existentes en la zona de estudio. Este cómputo ha de ser tal que permita: (1) establecer las condiciones de contorno de los modelos de evolución, en el caso de playas abiertas, o (2) la constatación de que es una playa encajada sin aportes o pérdidas externas. La primera tarea a realizar en la determinación del balance sedimentario es la identificación de los elementos más relevantes, esto es, fuentes y sumideros de sedimentos, tipos de sedimentos y mecanismos de transporte.

Entre las fuentes usuales se encuentran:

- Erosión de acantilados.
- Aportes fluviales.
- Aportes biogénicos.
- Aportes desde la plataforma continental.
- Aportes debidos al viento.
- Aportes humanos (regeneraciones, vertidos de dragados, ...).

Entre los sumideros usuales se encuentran:

- Sedimentación en estuarios, puertos y otras estructuras.
- Sedimentación en el trasdós de la playa por el viento y/o por el oleaje.
- Transporte hacia la plataforma continental.
- Descomposición de la arena.
- Extracción por el hombre.

Los mecanismos de transporte fundamentales a considerar son:

- Transporte longitudinal debido al oleaje.
- Transporte transversal debido al oleaje.
- Transporte debido a la acción de corrientes de marea y viento.
- Transporte eólico.
- Transporte por el hombre.

Para la realización del balance sedimentario, en lo correspondiente a la aportación desde el lado del mar, los modelos recomendados son los de una o varias líneas, los cuales están preparados para incorporar en ellos todo tipo de aportaciones y pérdidas al sistema (incluidas la eólicas) así como las variaciones causadas por el transporte longitudinal y transversal debido al oleaje y a las corrientes.

2.2.5. Rangos de aplicación de los modelos de utilizados en el diseño de playas

Los modelos utilizados en el diseño de playas pueden dividirse en Modelos de evolución y en Modelos de equilibrio.

El campo de aplicación de estos modelos y una breve descripción de los mismos se realiza en las tablas 2.2.4.

2.2.5.1. Modelos de evolución de playas

Los modelos de evolución tratan de determinar las modificaciones que la dinámica marina producirá en la playa. Estos cambios dependerán tanto de las condiciones del clima marítimo (oleaje, mareas, viento, precipitación, etc.) como de las características de las arenas de la playa (tamaño, distribución granulométrica y espacial del sedimento, densidad y composición de los granos, etc.).

A la hora de seleccionar un modelo de evolución, es importante tener en cuenta que, en la actualidad, no existe ningún modelo capaz de describir la morfodinámica de una playa en todo el rango de escalas espacio - temporales. Por ello, es muy importante conocer la escala espacio – temporal del campo de aplicación de cada uno de los modelos.

2.2.5.2. Modelos de equilibrio de playas

Los modelos de equilibrio de playas tratan de predecir la forma media o de equilibrio de una playa sometida a un determinado clima marítimo. Los modelos empíricos de evolución del perfil y los de morfodinámica pueden considerarse como una extensión de estos modelos a condiciones medias variables a lo largo del año. En general, son modelos semiempíricos sencillos, de gran uso en ingeniería, que simplifican la forma de la playa en una línea de costa y en un perfil equilibrio. Todos estos modelos son de macroescala y largo plazo (superior a meses).

Tabla 2.2.4. Modelos de evolución de playas.

MODELO TIPO		DESCRIPCIÓN
ANALÍTICO-NUMÉRICOS DE EVOLUCIÓIN	**Evolución ola-corriente 3D**	Describen la morfodinámica en escalas de tiempo desde el orden de segundos hasta el orden de las horas. En general, son modelos que acoplan un modelo hidrodinámico tridimensional con un modelo de transporte. Su resolución espacial se encuentra en el orden de los m, por lo que no simulan las formas de microescala como ripples, dunas o antidunas. En la actualidad, y dada su complejidad numérica, se emplean para la determinación de la evolución de fondos en zonas singulares, como es el caso de la socavación en las proximidades de estructuras costeras.
	Evolución ola-corriente Cuasi-3D	Se diferencian de los 3D en que utilizan un modelo de corrientes integrado en vertical y en el oleaje al que añaden un determinado perfil vertical de velocidades.
	Evolución ola-corriente 2DH	Acoplan un modelo hidrodinámico integrado vertical (2DH) con un modelo de transporte de sedimento. Tienen un campo de aplicación similar a los 3D y cuasi-3D. En general, el modelo hidrodinámico de corrientes está basado en las ecuaciones de Navier – Stokes integradas en el período del oleaje y en profundidad, por lo que su resolución temporal es superior al período del oleaje. La propagación del oleaje debe resolverse mediante un modelo acoplado externo basado en la ecuación de la pendiente suave que no resuelve las interacciones no lineales entre ondas que dan lugar a componentes del surf - beat. Recientemente, los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq permiten resolver la escala del oleaje y los movimientos medios mediante las mismas ecuaciones, por lo que la escala de tiempos puede incluir las oscilaciones del oleaje y las interacciones onda larga – onda corta en la playa son descritas correctamente.
	Evolución del perfil 2DV	Estos modelos acoplan un modelo hidrodinámico 2DV con un modelo de transporte. Como en el caso anterior, el modelo hidrodinámico puede estar formado por un modelo externo de oleaje (en este caso sólo incluirá asomeramiento) y un modelo de corrientes promediado en el período del oleaje, por lo que, en este caso, su resolución temporal será superior al período del oleaje. En el caso de que el modelo de propagación sea de Boussinesq, la hidrodinámica resolverá simultáneamente el oleaje y los movimientos medios, así como las interacciones no lineales entre ondas. Como en el caso de los modelos anteriores, estos modelos no resuelven las formas de microescala como ripples, dunas y antidunas.
	Evolución del perfil	Surgen como extensión de los modelos empíricos de perfil de equilibrio. El perfil se define mediante una o varias condiciones de equilibrio basadas en la dinámica del oleaje y mareas. Los parámetros del perfil se determinan mediante su relación con las condiciones de oleaje, marea y características de los sedimentos. Asumiendo que las condiciones de oleaje permiten al perfil alcanzar un equilibrio, una vez conocido el clima marítimo se puede definir una estadística de evolución del perfil de una determinada playa. Estos modelos son de macroescala, no pudiendo definir formas menores en el perfil como son barras, escalones, escarpes, barras crecientes, etc. La escala de tiempos es de largo plazo i.e. semanas o meses.
EVOLUCIÓN EMPÍRICOS	**Evolución de la línea de costa, modelos de una o varias líneas**	Estos modelos no tratan de resolver la compleja hidrodinámica del oleaje y corrientes en la zona de rompientes. Son modelos de macroescala, que no resuelven las formas de lecho como ripples o antidunas o las formas de media escala o macroescala como beach cusps o megacusps (salvo que estos sean el resultado de una variación rítmica del oleaje incidente). Asimismo, la escala de tiempos comienza en estados de mar, es decir, desde las horas y pueden extenderse durante toda la vida útil de la playa si es preciso, por lo que convergen con los modelos de equilibrio. Los módulos que componen estos modelos suelen ser un módulo de propagación de oleaje más o menos complejo, un módulo de transporte longitudinal muy sencillo y un módulo de cambio de la línea de costa también muy básico, basado en la ecuación de conservación del sedimento. Son modelos muy utilizados en la ingeniería de playas. Entre estos modelos son de destacar los modelos de una o varias líneas.
	Evolución morfodinámica	Son modelos empíricos para la predicción de la evolución de la forma de las playas en función de las condiciones del oleaje, marea y tipo de sedimentos. La forma de las playas se simplifica mediante la definición de una serie de "estados de playa" y las condiciones hidrodinámicas y de sedimentos se implementan mediante parámetros adimensionales. Debido a su sencillez, muy utilizados en la ingeniería, pues permiten determinar, de forma estadística, la calidad de la playa y la formación de formas rítmicas de media y gran escala, que no pueden ser predichas con los modelos anteriores. Al constituir los estados de playa una especie de situaciones de equilibrio de la playa con la dinámica, estos modelos son de media escala espacial y de largo plazo i.e. semanas o meses, por lo que la información que proveen es de tipo estadístico.

Tabla 2.2.4. (Continuación) Modelos de equilibrio de playas	
MODELO	**DESCRIPCIÓN**
Perfil de equilibrio	Estos modelos son de carácter empírico o semiempírico, se basan en alguna condición teórica de equilibrio entre la hidrodinámica y el transporte a través del perfil. El modelo de perfil de equilibrio más conocido es el de Dean, donde la forma del perfil de equilibrio es independiente de la dinámica marina. En los últimos años, se ha logrado definir el perfil de equilibrio en función de las condiciones medias de la dinámica, con lo que estos modelos pueden ser utilizados como modelos de evolución de largo plazo.
Forma en planta de equilibrio	Al igual que en el caso de los modelos de perfil de equilibrio, éstos definen la forma de la línea de costa de una playa en función de las características medias del oleaje. Son modelos empíricos, que con muy poca información sobre la dinámica marina permiten predecir la línea de costa media o de equilibrio, por lo que son de gran utilidad en el diseño de playas.

2.3

Morfología de las dunas

2.3.1. Introducción

Las dunas se crean por la interacción entre el material granular (arena) y la fuerza de corte ejercida por el aire en la capa límite atmosférica. La morfología de las dunas refleja: 1) las características del sedimento, principalmente el tamaño del grano y 2) las características del viento superficial, tanto en lo que se refiere a la tensión tangencial en la superficie como a la variabilidad direccional del régimen anual. En la mayoría de las dunas costeras, la vegetación, detritos y los obstáculos topográficos son también factores determinantes en la formación de las dunas. A medida que la duna crece bajo la capa límite atmosférica, comienza a modificar el flujo primario. Estas modificaciones juegan un papel muy importante en la determinación de la morfología de las dunas.

Las geometrías que resultan de la acumulación eólica son muy diversas, con escalas de tamaños variables, muchas de ellas ampliamente referenciadas en ambientes desérticos. En el caso

de la franja litoral, las dimensiones de las dunas equivalentes suelen ser comparativamente menores, se generan geometrías específicas por la presencia de vegetación y la humedad ambiental permite la estabilidad de láminas de sotavento con pendientes elevadas (hasta 40º).

Las dunas costeras son un elemento dinámico del paisaje. Las dunas crecen a partir de la arena depositada por el oleaje en las bermas de playa. La arena de estas bermas se seca en los períodos de buen tiempo, pudiendo ser transportada por los vientos procedentes del mar hacia el interior, donde la disminución de la velocidad del viento debido al mayor rozamiento inicia el proceso de acumulación de la arena, proceso que con frecuencia se ve acelerado por la presencia de vegetación o de obstáculos, iniciando la formación del sistema dunar. La interrelación entre la aportación de sedimento arenoso por el mar y la vegetación es lo que define el desarrollo de las dunas costeras en las zonas templadas. En dichas zonas, donde la precipitación es suficiente para el crecimiento de la vegetación, la morfología de los sistemas dunares tiene una relación directa con la distancia desde la duna al mar, debido a que el ambiente salino y desecante que aportan los vientos marinos y la falta de nutrientes selecciona el tipo y variedad de vegetación que puede crecer en cada una de las zonas.

Las dunas costeras aparecen en todo el mundo distribuidas en una amplia variedad de regímenes climáticos. Las dunas costeras se forman en aquellos lugares de la costa donde hay dos requerimientos básicos: 1) disponibilidad de aportes de arenas de playa de tamaño adecuado, y 2) vientos procedentes del mar capaces de transportar las arenas hacia el interior, al menos parte del año. Estos requerimientos, junto con la participación de corrientes y oleaje, hacen que el proceso de formación y mantenimiento de dunas costeras dependa, por tanto, de una fuerte relación de los sistemas playa – duna siguiendo un modelo de proceso-respuesta. Estos dos sistemas evolucionan mutuamente ajustados mediante el intercambio de sedimentos Sherman y Bauer (1993).

La presencia de vegetación, si bien no es esencial para la formación de dunas costeras, tiene una influencia muy importante en la morfología dunar. La cobertura vegetal participa en la fijación de las arenas y modifica las características de la superficie en relación al flujo del viento Packham y Willis (1997). Dadas las características de los sistemas dunares españoles, consideraremos la vegetación como un elemento necesario en la génesis y desarrollo de las dunas costeras españolas.

En general, la vegetación puede desarrollarse sobre dunas costeras de todo tipo de climas (sólo en zonas áridas donde la precipitación media anual es menor de 50 mm no se desarrolla vegetación sobre dunas), siendo el principal factor natural limitante los regímenes de viento de gran intensidad, que provocan intensos procesos de erosión y acumulación de arenas (Tsoar, 2001).

Sin embargo, este tipo de situaciones son infrecuentes y la mayor parte de las dunas costeras del mundo presentan vegetación que participa en el proceso de formación y evolución de las mismas.

Las dimensiones de las dunas costeras en cuanto a las alturas varían desde 1-2 m hasta 20-30 m, aunque hay casos con alturas superiores a 100 m, con pendientes del lado de barlovento muy variables, dependiendo de la cobertura vegetal y el carácter progradante, en equilibrio o en erosión del sistema dunar y con pendientes elevadas en el lado de sotavento.

En este apartado se presenta la definición de algunos términos, conceptos y procesos involucrados en la morfología de las dunas.

2.3.2. Factores que pueden determinar la morfología de un campo dunar costero

Las dunas costeras son el resultado de la interacción entre el viento y las superficies arenosas de la playa y las dunas, por lo que las características de ambos juegan un papel determinante en la morfología del campo dunar. Estas interacciones se ven moduladas por la vegetación y el propio crecimiento de la duna, que modifican el perfil del viento. En principio, los factores que determinan el tipo, alineación, tamaño y espaciado de las dunas son los siguientes (Flor, 2004):

1. Naturaleza de las arenas, especialmente su tamaño y clasificación.
2. Características del régimen de vientos y de la orientación de la playa respecto a los mismos.
3. Aportación de arena al sistema dunar.
4. Cubierta de vegetación.
5. Topografía de la zona terrestre adyacente a la playa.
6. Posición del nivel freático.
7. Grado de humedad propio del la zona costera.

2.3.2.1. Influencia de la granulometría de la arena

Los rangos granulométricos, dentro de la fracción arenosa, deben ser los adecuados en la playa, generalmente con una proporción mayoritaria de las fracciones más finas del conjunto ya que el viento se manifiesta como un agente dinámico selectivo de dichas fracciones menores. No obstante, vientos intensos son capaces de transportar la casi totalidad de las poblaciones granulométricas, pudiendo llegar a existir escasas diferencias en los tamaños medios entre la playa donante y la duna receptora.

2.3.2.2. Influencia del régimen de vientos y orientación de la playa respecto a los mismos

La actuación de vientos soplando desde mar hacia tierra con capacidad suficiente para transportar el sedimento fuera de la zona de influencia (oleajes y mareas) de la misma es un requisito fundamental para la formación de un sistema dunar costero ya que vientos actuando paralelamente al perfil costero solamente favorecen el transporte de deriva litoral y la formación de playas progradantes, pero sin campos dunares asociados. La orientación de la playa con una disposición preferentemente perpendicular u oblicua a los vientos con mayor capacidad de transporte permite la formación de campos dunares más amplios.

En una costa, actúan varios componentes de viento dependiendo del clima marítimo. Son los vientos reinantes los que ejercen una influencia más acusada sobre el emplazamiento de sedimento en los campos dunares y éste es más efectivo cuanto más perpendicular sea la dirección del flujo resultante en relación con la orientación del límite playa-duna. Además, cada componente de viento, en función de su intensidad y dirección, tiende a generar una tipología geométrica determinada de duna.

El régimen de vientos es un factor determinante de la morfología dunar en las zonas áridas. Como se describirá posteriormente, los barjanes y las dunas crecientes se forman en presencia de vientos unimodales, las dunas lineales aparecen con vientos bimodales, mientras que las dunas estrella se forman en regímenes de viento multimodales muy variables. Dada la prevalencia de los vientos provenientes del mar, los barjanes y los cordones de dunas crecientes suelen ser los que dominan las dunas costeras en áreas desiertas.

En las zonas con humedad suficiente, la vegetación tiende a estabilizar las dunas, pero cambios en la dirección del viento y tormentas fuertes pueden modificar la forma de las dunas, resultando una distribución compleja de colinas y depresiones, típicas de las dunas costeras.

2.3.2.3. Relación de las formas dunares con la disponibilidad de sedimento

La disponibilidad de un volumen excedentario arenoso en el borde costero y más concretamente en la playa suministradora o solidaria del campo dunar adyacente, es condición indispensable para la formación del campo dunar. Este condicionante es también fundamental ya que el depósito sedimentario eólico se constituye en la reserva que la playa almacena para su supervivencia futura ante un cambio en sentido contrario, predominantemente erosivo, en la evolución de la costa.

2.3.2.4. Influencia de la vegetación

La arena es un buen medio para el crecimiento de determinadas plantas debido a su capacidad de retención de la humedad que tiene la arena. La vegetación juega un papel determinante en la formación del sistema dunar costero, especialmente en las zonas con humedad suficiente para su germinación y crecimiento. La presencia de la vegetación reduce el transporte sedimentario debido a que: 1) introduce una rugosidad mayor en la superficie, lo que disminuye el flujo del viento sobre la misma y 2) intercepta los granos en saltación y actúa como una superficie blanda que absorbe una gran cantidad de energía, favoreciendo la sedimentación. La colonización vegetal del campo dunar, representada por comunidades específicas, que se disponen en bandas paralelas al límite playa-duna, determinando la sedimentación en general y la formación de tipologías concretas de dunas, en particular, como los cordones dunares, montículos aislados, etc.

2.3.2.5. Influencia de la topografía de la zona terrestre adyacente a la playa (posplaya)

Es necesaria una superficie de posplaya lo suficientemente amplia para albergar y permitir la mayor sedimentación posible. Los campos dunares costeros de mayores dimensiones ocupan áreas que reúnen este requisito; suelen representar zonas supramareales de playa con bermas amplias o relieves de ladera con pendientes suaves. En muchos casos, laderas más abruptas son capaces de contener dunas cuya sedimentación termina suavizando la pendiente inicial, siempre y cuando la tasa de sedimentación en la costa sea muy importante y los vientos adquieran una capacidad de transporte muy alta. En cualquier caso, este tipo de dunas ocupan áreas relativamente poco extensas; son muy numerosas en las costas cantábrica, gallega, gaditana y gerundense.

2.3.2.6. Posición del nivel freático

La posición del nivel freático que, en estas áreas tiende a situarse muy superficialmente, condiciona la fijación del sedimento arenoso y su participación en el desarrollo de algún tipo de dunas, como las parabólicas en las que el amplio corredor plano entre los brazos sedimentarios es una superficie de no erosión ni sedimentación. También esta tabla freática impide que progrese la erosión por debajo, caso de las depresiones erosivas ("blowout") de tipo subcircular y alargado.

2.3.2.7. Grado de humedad propio del la zona costera

El grado de humedad propio del borde costero por la influencia marina sobre el aire y el suelo, en este caso actuando sobre los granos sedimentarios, dotándose de incierto grado de cohesión. Se favorece la sedimentación definitiva de las arenas y condiciona el tipo de colonización vegetal.

2.3.3. Morfología dunar

El tipo dunar más simple es la duna creciente o transversal, en la que el viento fluye prácticamente perpendicular a la línea de cresta. En ausencia de vegetación y otros factores como los topográficos, una sección transversal de dicha duna puede ser reprentada por la figura 2.3.1.

Como puede verse, la sección transversal de la duna de la figura 2.3.1 presenta una cara de barlovento de pendiente suave que corona en una cresta prácticamente horizontal, con un quiebro brusco de la pendiente o borde en la cara de sotavento o de avalancha, que en general presenta una pendiente próxima a la del ángulo de reposo de la arena (34º a 40º según la humedad), con valores máximos de la pendiente en la parte superior, que van disminuyendo hacia la base o falda de la duna. Según las condiciones de viento y humedad, en determinadas ocasiones se forma una

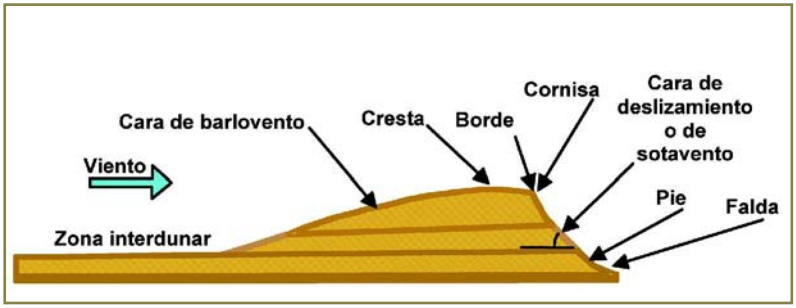


Figura 2.3.1. Morfología y terminología de una duna transversal simple.

cornisa en el borde de avalancha. En el caso de dunas móviles, el avance de la duna deja zonas de deflación cuasi-horizontales denominadas depresiones o zonas interdunares.

En las dunas costeras, la dominancia de los vientos marinos, la presencia de la vegetación y eventualmente, la erosión causada por el pisoteo, el pastoreo y la posición del nivel freático genera formas dunares muy diversas, algunas de las cuales se han representado en la figura 2.3.2. Las formas dunares representadas en esta figura son (Flor, 2004):

A) Cordón dunar simple.
B) Duna tabular, que si bien no es muy numerosa, puede sustituir al cordón dunar en determinadas circunstancias; en este apartado, se han recreado dunas prismáticas o montículos aislados.
C) Dunas remontantes o rampantes de bajo y alto ángulo.

D) Barjanes.
E) Dunas parabólicas o en forma de U.
F) Depresión o casquete subelíptico de erosión ("blowout") con ribete sedimentario sobre un fondo plano por implicación de la tabla freática.
G) Depresión o casquete alargado de erosión.
H) Duna lingüiforme con cresta ligeramente convexa.
I) Parte de un aklé, en este caso la forma protuberante de un sistema de barjanes coalescentes, también denominados duna barjanoides; los bordes laterales constituyen barjanes verdaderos.

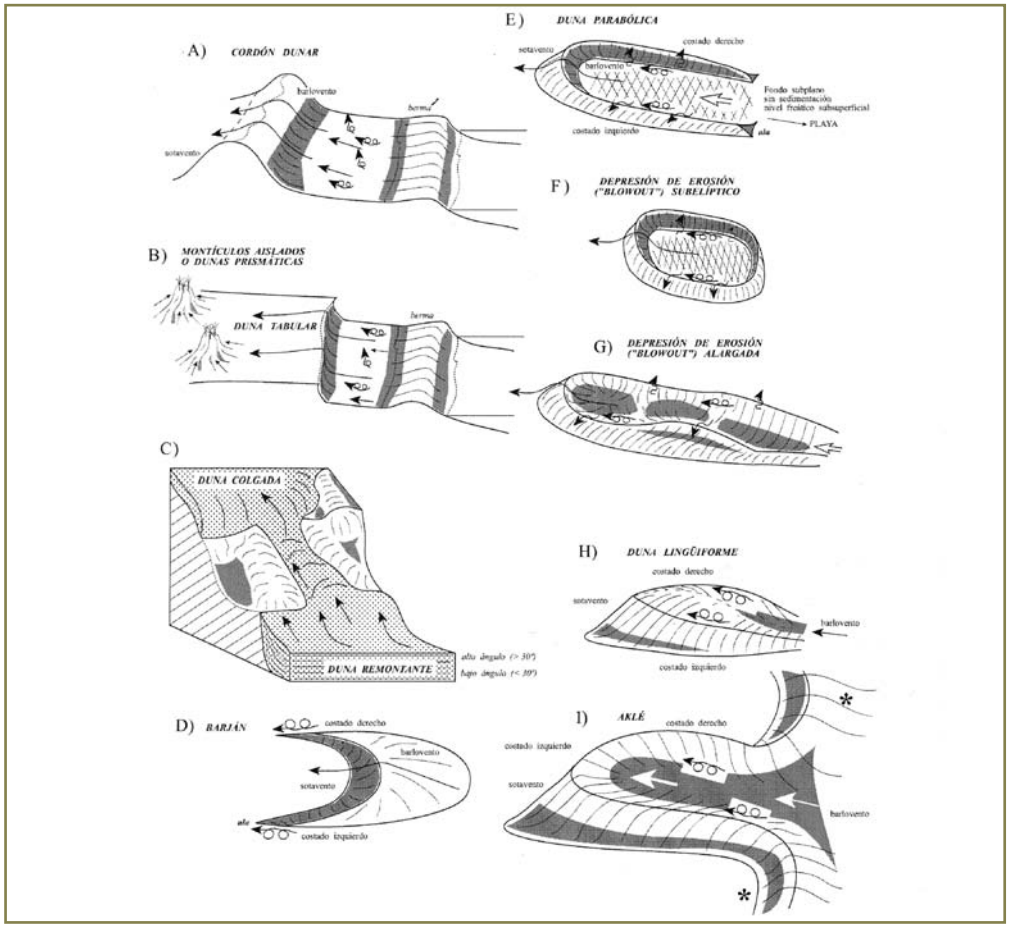


Figura 2.3.2. Diversas tipologías de dunas costeras. (Flor, 2004).

2.3.4. Morfología de un sistema dunar costero

2.3.4.1. Introducción

La morfología de las dunas costeras depende de la velocidad del viento (su capacidad de transporte), de la cantidad de arena disponible, de la fisiografía del sector costero y del tipo de vegetación. La vegetación tiene un papel importante no sólo por su capacidad de estabilizar los depósitos arenosos, sino también por su influencia en el flujo del viento y de arenas que éste transporta. De forma secundaria, la frecuencia de inundaciones por agua de mar, la acción del oleaje y la dirección del viento también influyen en el desarrollo morfológico de la duna.

2.3.4.2. Morfología de los sistemas dunares costeros vegetados

El flujo del viento y de la arena se ve modificado por las características de la cubierta de la vegetación: densidad, morfología, distribución y altura. Las densas y altas formaciones vegetales que origina el barrón, en las costas de la Europa atlántica y mediterránea, producen dunas altas y estrechas, con una acumulación de arenas producida preferentemente en el borde expuesto al viento, debido a la fuerte reducción de la velocidad del aire y por tanto, del transporte por saltación. Este fenómeno genera dunas embrionarias asimétricas con mayores pendientes en el borde expuesto al viento. En otras áreas biogeográficas donde las especies formadoras de dunas tienen crecimiento rastrero (*Spinifex*: Nueva Zelanda; *Ipomoea*/Cannavalia: México), la reducción del flujo de aire y arenas es menor, formando dunas asimétricas con la mayor pendiente situada en el lado protegido del viento.

La formación de cordones dunares continuos se produce en zonas donde las tasas de acreción son relativamente rápidas y la vegetación es densa y alta Hesp (2002). Los cordones dunares ya establecidos varían ampliamente en tamaño, desde uno o dos metros hasta más de 30 m en determinadas circunstancias. La cobertura de vegetación y el tipo de especies presentes también es muy variable y está en función de la región biogeográfica, el clima y la historia, estabilidad, exposición y dinámica sedimentaria existente Hesp (1991). En el caso de las dunas españolas, es de especial importancia las diferentes regiones biogeográficas y climáticas existentes, con un claro contraste de las dunas atlánticas y mediterráneas frente a las de las Islas Canarias.

Cuando un sistema dunar costero es progradante, se suelen formar una serie de cordones dunares paralelos, desde el más joven o duna embrionaria, situado en la parte alta de la playa seca, hasta los más antiguos, dunas grises o terciarias, que en los climas templados suelen estar completamente estabilizados por la vegetación. Una breve descripción de los diferentes elementos que encontramos en una sección transversal de un sistema dunar costero se presenta en figura 2.3.3.

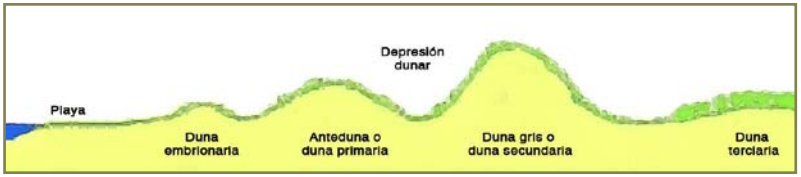


Figura 2.3.3. Corte transversal típico de un sistema dunar costero.

Duna embrionaria

La primera línea de dunas en un sistema dunar progradante (que tiene una aportación neta de sedimento hacia la duna) corresponde a la duna más joven, denominada *duna embrionaria*. Esta duna está situada en una zona hostil a la vegetación debido a la alta salinidad, falta de humus y pH alcalino (8 – 9) debido a la presencia de fragmentos de conchas en la arena. Asimismo, es un ambiente muy seco, por el alto drenaje y la exposición al viento. Sólo algunas especies de hierbas muy especializadas pueden sobrevivir en este ambiente, por ejemplo, la *Agropyron junceiforme*. La cobertura vegetal es muy pequeña del orden del 20 %. Los oleajes de los temporales invernales pueden destruir estas proto-dunas, para volver a reconstruirse en los períodos de buen tiempo.

Anteduna o duna primaria

La *anteduna o duna primaria* (*foredune*) se sitúa inmediatamente detrás de la duna embrionaria. Estas dunas son más antiguas y altas y con frecuencia se denominan dunas blancas debido a su cobertura parcial de vegetación, del orden del 80 %. En estas dunas y en las zonas templadas, domina el barrón (*Ammophila arenaria*).



Foto 2.3.1. Anteduna parcialmente estabilizada por barrón.

Depresiones interdunares

Las *depresiones interdunares* (*dune slacks*) se sitúan entre las antedunas y las dunas principales. En las zonas templadas, en invierno estas depresiones pueden estar cercanas o incluso por debajo del nivel freático. Esta mayor disponibilidad de agua y la protección del viento que proveen las antedunas hacen que la vegetación prolifere y cubra prácticamente el suelo, lo que acelera la creación de humus.

Duna secundaria o duna gris

Esta duna se sitúa hacia tierra de la depresión interdunar. En la *duna secundaria* las condiciones para el crecimiento de las plantas son mejores. El pH de estas dunas es más reducido que en las antedunas (entre 7,5 y 6,5) y además, hay más abrigo y el viento acarrea menos sal. Con estas condiciones, el número de especies se incrementa, cubriendo en algunas zonas totalmente la superficie arenosa. Una fina capa de humus se desarrolla a medida que las plantas se marchitan. La humedad y los nutrientes presentes en el humus colaboran en la colonización de esta duna.

Duna terciaria o zona de arbustos y bosque

Tras las dunas secundarias se encuentran las *dunas terciarias*, a menudo completamente cubiertas de arbustos en la zona más cercana al mar y bosque como vegetación climax de las zonas templadas. En la mayoría de los sistemas dunares de las zonas templadas, la vegetación de las dunas terciarias está controlada por los usos humanos, y raramente se encuentra la vegetación natural. Es frecuente la utilización de estas dunas como pastos o la repoblación de las mismas con especies foráneas como el pino marítimo, con el objetivo de estabilizar las dunas.

2.3.4.3. Sistemas dunares costeros no vegetados

En aquellas zonas costeras donde la precipitación no es suficiente para el mantenimiento de la vegetación, los sistemas dunares costeros suelen estar formados por las tipologías dunares de las áreas desiertas, con dunas altamente móviles. Dada la prevalencia de los vientos marinos, en la zona cercana a la costa predominan los tipos dunares asociados a vientos unimodales como son las dunas crecientes, con sección transversal similar a la indicada en la figura 2.3.1. Si el régimen de vientos es variable, pueden aparecer todos los tipos dunares asociados a las áreas desiertas: dunas transversales, lineales y de estrella, descritos en las clasificaciones del apartado 2.3.5.

2.3.5. Clasificaciones de las dunas y campos dunares

Existen muchas clasificaciones morfodinámicas en las que las dunas se ordenan por su forma y relación con los vientos que las forman, especialmente por su alineación con relación al vector resultante del transporte neto de sedimento. El problema de estas clasificaciones es que asumen conocido del proceso de formación de las dunas, que es hasta la fecha incompleto. Por otro lado, el grado de cobertura vegetal y la erosión de la misma inducida por la dinámica marina, la actividad humana o la animal, introduce formas complejas en los cordones dunares costeros, por lo que no es posible apoyarse en una clasificación única.

En este apartado, se distinguen dos tipos básicos de dunas o campos dunares costeros: los asociados a los ambientes desérticos, donde la presencia de vegetación es escasa y no determinante en la dinámica dunar, caso de los campos dunares en las Islas Canarias y aquellos en los que la vegetación es determinante en la formación del sistema dunar.

2.3.5.1. Clasificación de las dunas costeras en ambientes desérticos no vegetados

La clasificación morfológica de McKee (1979) agrupa las dunas no vegetadas en función de su forma y del número de caras de deslizamiento, proponiendo seis grupos principales: *barjanes, crecientes, lineales, reversas, estrella y parabólicas*, ver figura 2.3.4.

Al mismo tiempo, dentro de cada una de estas formas principales, se pueden encontrar tres variedades de tipos de dunas: *simples, compuestas y complejas*. Las dunas simples corresponden a cada uno de los seis tipos básicos indicados anteriormente. Las dunas compuestas por la superposición de dos escalas de dunas del mismo tipo morfológico, como por ejemplo, la superposición de pequeñas dunas crecientes sobre las laderas de barlovento de dunas crecientes de mayor escala. Las dunas complejas ocurren cuando se superponen dos escalas de dunas de dos tipos diferentes, como en el caso de la formación de pequeñas dunas crecientes en los lados de grandes dunas lineales.

Además de los tipos dunares anteriores, algunos campos dunares contienen áreas con superficies arenosas relativamente planas o ligeramente ondulantes denominadas *sábanas de arena* y en otros casos, formas de dunas bajas ondulantes sin cara de deslizamiento denominadas *zibar*. La interacción entre la vegetación y el sedimento o los obstáculos da lugar a la acumulación de arena a sotavento de los mismos, formándose *colas de arena*. Donde la arena se acumula en zonas adyacentes a obstáculos topográficos se forman *dunas eco* o *dunas remontantes*, en el lado de barlovento y *dunas de proyección* y *dunas descendentes*, en el lado de sotavento del obstáculo. En otras situaciones, los obstáculos o la vegetación forman *montículos deposicionales*, los cuales suelen tomar una tendencia longitudinal debido a la persistencia o dominancia de una de las componentes del viento; en otros casos se forman *montículos o domos vegetados* que se conocen como "coppice dunes", bien representados en campos dunares con una sedimentación deficitaria, especialmente en costas subáridas donde crece vegetación de tipo matorral, similares a las desérticas.

La mayoría de los grandes tipos dunares en ambientes desérticos se pueden acomodar a la clasificación de Pye and Tsoar (1990). Una versión de la cual puede verse en la figura 2.3.4.

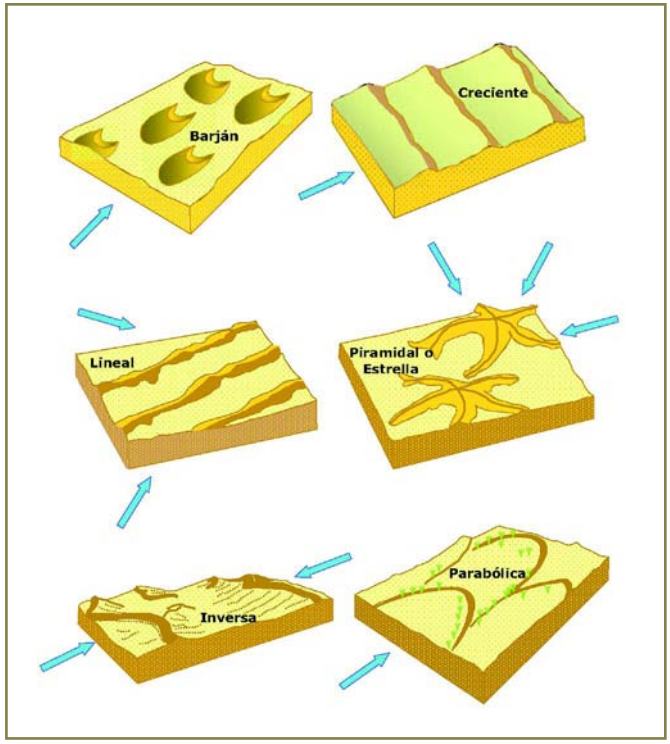


Figura 2.3.4. Tipos principales de dunas. modificada de McKee (1979). Flechas: Vientos dominantes.

Dunas crecientes

Los tipos de dunas más sencillos son aquellos que se forman bajo regímenes de viento caracterizados por variaciones de dirección y sentido pequeñas. En ausencia de vegetación, las dunas crecientes serán las formas dominantes en regímenes de viento cuasi-unidireccionales. Este tipo de duna es estable hasta variaciones en la dirección del viento de 15º alrededor de la dirección media. Donde la disponibilidad de arena es limitada, se formarán dunas crecientes aisladas o barjanes, caracterizados por una cara de barlovento de pendiente baja y una cara de deslizamiento en forma de luna creciente con los cuernos avanzando en la dirección del viento (ver figura 2.3.4); a medida que aumenta la disponibilidad de arena, los cuernos de los barjanes se unen con los contiguos formando una cordones de dunas crecientes relativamente ondulantes, con la dirección principal de las crestas perpendicular a la dirección del viento y presentando claramente una cara de barlovento de suave pendiente y una cara de

sotavento o deslizamiento con pendiente en el límite de equilibrio de la arena (ver figura 2.3.4).

Si la duna sigue creciendo, pueden formarse dunas crecientes compuestas, en las que dunas crecientes menores se forman sobre la cara de barlovento de la duna mayor. También se pueden formar dunas crecientes en las caras de las grandes dunas de estrella, formando dunas complejas.

Dunas lineales

Las dunas lineales se caracterizan por su gran longitud, rectitud, paralelismo, espaciado regular y una relación elevada entre la zona de duna y la interdunar. Estas dunas son transversalmente simétricas y en planta pueden ser sinuosas. La posición de la cresta oscila en función de la variabilidad estacional de la dirección del viento (ver figura 2.3.4). Las dunas lineales se desarrollan en áreas con regímenes de viento provenientes de un mismo sector pero con una amplia variabilidad direccional, o en zonas con regímenes de vientos bi-direccionales (vientos procedentes de dos direcciones diferentes) y muy raramente, en zonas con regímenes direccionales de viento complejos.

Dunas piramidales o en estrella

Las dunas en estrella se caracterizan por su gran tamaño y forma piramidal, con tres o cuatro brazos que radian desde un pico central (ver figura 2.3.4). Cada brazo tiene una cresta sinuosa, con caras de avalancha que se alternan en función de la dirección del viento dominante en cada temporada. La parte superior de las dunas estrella es muy pendiente, con valores entre 15º y 30º. La base es muy ancha y con pendientes suaves, entre 5º y 10º. En los flancos inferiores se pueden formar dunas crecientes o reversas menores, dando lugar a una duna estrella compleja. Las dunas en estrella están asociadas a regímenes de viento multidireccionales, con un transporte neto anual relativamente bajo.

Dunas parabólicas

Las dunas parabólicas son comunes en muchas zonas costeras (ver foto 2.3.2) y en zonas semiáridas. Estas dunas se caracterizan por su forma en U con los brazos vegetados parcialmente estabilizados y retrasados con respecto al sentido del viento de 1 a 2 Km de longitud y una zona activa en el cuenco de la U, con una altura entre 10 y 70 m, que avanza por avalancha (ver foto 2.3.2). Las condiciones bajo las que se desarrollan las dunas parabólicas no están todavía bien determinadas. Normalmente, están asociadas a áreas con una cubierta vegetal moderada y con régimen de viento unidireccional.



Foto 2.3.2. Formación de una duna parabólica a partir de una depresión o casquete eólico.

2.3.5.2. Clasificación de las dunas y campos dunares costeros vegetados

La inclusión de la humedad y, fundamentalmente, de la colonización vegetal son factores que desencadenan la aparición de formas individuales y conjuntos formados por la yuxtaposición de una o varias formas más propias, pero no exclusivas, de las dunas costeras; algunos autores las refieren como dunas vegetadas en sentido amplio Goldsmith (1985), pero pueden distinguirse algunas geometrías.

Dada la predominancia de los vientos marinos en la costa, la gran mayoría de las dunas costeras son de tipo creciente y en el caso de estar vegetadas, se desarrollan *colas de arena* y *dunas parabólicas*, estas últimas frecuentemente asociadas al desarrollo de *depresiones* o *casquetes eólicos (blowouts)* (ver foto 2.3.2).

Los depósitos costeros de arenas eólicas han dado lugar a una importante variedad de formas dunares. La clasificación de estas formaciones es también muy variada, ofreciendo esquemas desde muy simples hasta muy elaborados, comprendiendo el sistema dunar en toda su extensión o sólo la zona de influencia marina directa (Pye y Tsoar, 1990).

Entre los criterios más frecuentemente utilizados en la clasificación de las dunas costeras, incorporando algún componente de la dinámica del sistema, se incluye la consideración del balance sedimentario: Klijn (1981), propone una clasificación morfogenética (dunas costeras en desarrollo, estables o recesivas). Psuty (1988), incorpora un modelo basado en la interacción de la disponibilidad sedimentaria en la playa y en la duna en distintas fases del desarrollo dunar y

propone una clasificación de los frentes costeros en dunas primarias y secundarias. Las dunas primarias, caracterizadas por un intercambio sedimentario activo con la playa, constituirían las únicas dunas costeras reales. En presencia de una alta disponibilidad sedimentaria en la playa, la morfología resultante se correspondería con una serie de cordones costeros paralelos y de poca altura. En caso contrario, se produciría la regresión de la duna costera y una topografía dominada por entrantes de marea. De forma similar, la clasificación propuesta por Carter (1990), (ver figura 2.3.5), se basa en tres niveles cualitativos de aporte sedimentario relacionados con la dinámica costera (dunas progradantes, estables y regresivas) que condiciona la morfología del sistema duna-playa y la composición y dinámica de la vegetación presente.

	APORTE SEDIMENTARIO		
	Bajo	**Medio**	**Alto**
a. Disponibilidad sedimentaria	Limitada	Compensada	Abundante
b. Ladera expuesta del frente costero	Erosiva	Mixta	Acumulativa
c. Playa emergida	Estrecha	Media	Ancha
d. Costa	Recesiva	Estable	Progradante
e. Sucesión vegetal	Regresiva	Sin sucesión	Progresiva

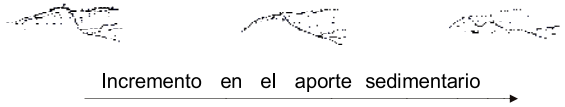


Figura 2.3.5. Criterio de clasificación de los frentes dunares costeros en base al aporte sedimentario (Modificada de Carter, 1990).

Otro grupo de clasificaciones consideran sólo aspectos ecológicos o conjuntamente la vegetación y la geomorfología en la tipificación de las dunas costeras (Goldsmith, 1977 y 1985; Hesp y Short, 1980 y Hesp, 1984), entre otros.

Hesp y Short (1980) y Hesp (1984) proponen una dicotomía basada en las características geomorfológicas y ecológicas de las dunas costeras. Un tipo dunar estaría integrado por depósitos eólicos costeros *incipientes*, originados a partir de la acumulación de arena en torno a vegetación pionera, y el segundo tipo dunar incluiría los depósitos eólicos costeros *estabilizados*, originados a partir de dunas costeras incipientes, donde la vegetación pionera ha sido sustituida por otro tipo de vegetación, generalmente leñosa. Los depósitos eólicos costeros incipientes se pueden a su vez subdividir en 5 tipologías basándose en la cobertura vegetal (Short y Hesp,

1982), (ver figura 2.3.6). En un extremo de esta subdivisión, la organización morfológica estaría dominada por el componente vegetal (frentes costeros fijados, paralelos a la línea de playa) y en el otro extremo, el factor dominante estaría representado por el componente eólico (cuencas de deflación, barjanes). Las fases intermedias se corresponderían con formas de transición caracterizadas por una topografía fragmentada.

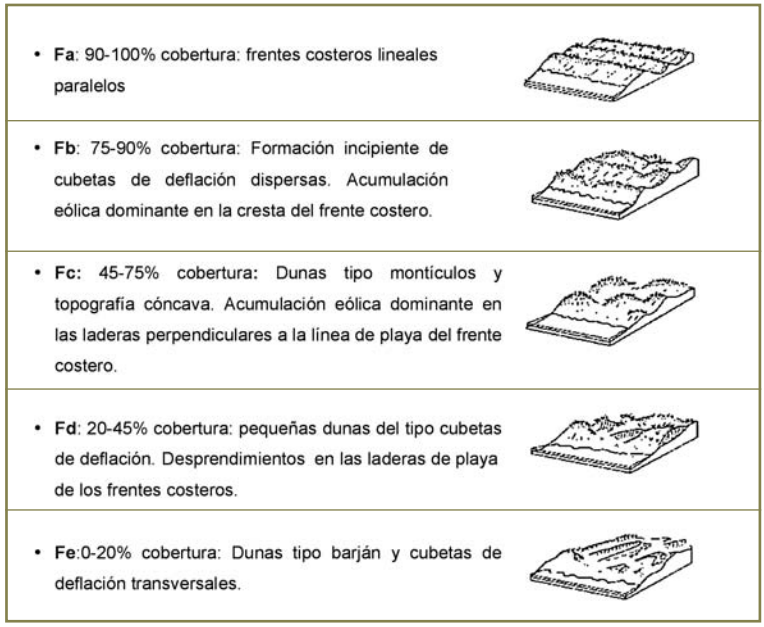


Figura 2.3.6. Clasificación de los frentes dunares costeros propuesta por Short y Hesp (1982).

Las morfologías y tipologías de dunas han sido principalmente investigadas en el Cantábrico por Flor (1980, 1981, 1983 y 1992). De tal forma que dicho autor ha diferenciado en algunas playas de este litoral dunas de diversa índole: barjanes, dunas longitudinales y transversales, eco, parabólicas, etc. Este autor propone una clasificación con criterios diferenciales que inciden en su geometría resultante: formas erosivas, sedimentarias y mixtas, control del relieve circundante y de la posplaya, geometría, componentes direccionales del viento, dependencia de la estructura del flujo y escala de tamaños. Se engloban la mayor parte de las formas resultantes dentro de las costas templado-húmedas y, por tanto, reconocibles en el territorio peninsular e insular del estado español. En la tabla 2.3.1 se muestra la propuesta de clasificación geomorfológico jerarquizada de dunas eólicas realizada por este autor, particularmente válida para costas de climas templado-húmedos.

Tabla 2.3.1. Clasificación de dunas costeras. Se mantienen la mayor parte de las denominaciones clásicas sobre los tipos de dunas exixtentes en la literatura (Flor, 2004).

A) DUNAS DEPOSICIONALES

I.- NO CONTROLADAS POR EL RELIEVE

1.- Formas tabulares – **dunas tabulares** ["sand sheets"] (M)

2.- Formas longitudinales
- a.- controladas por la colonización vegetal – **montículos deposicionales**: (M)
  - **montículos cónicos** ["conical mounds"] (vientos persistentes) (-forma piramidal -forma lobulada)
  - **colas de arena** ["shadow dunes"] (vientos persistentes)
  - **domos vegetados** ["coppice dunes"] (vientos persistentes)
- b.- no controladas por la colonización vegetal:
  - **dunas longitudinales** (vientos intensos con una dirección predominante) (D y H*)
  - **dunas de proyección** ["lee-projection dunes"] (flujos intensos unidireccionales soplando sobre sotavento)(M)
- c.- indiferentes:
  - **dunas lingüiformes** (vientos intensos con una dirección predominante) (D y H*)
  - **dunas aklé** (vientos intensos con una dirección predominante) (D y H*)

3.- Formas transversales
- **cordones dunares** ["foredunes"]
  - irregulares (vientos predominantes y otros: vegetación irregular) (H)
  - simétricos (vientos predominantes moderados, vegetación uniforme) (H)
- **dunas transversas** (vientos predominantes) (D y H*)

4.- Formas mixtas
- **barjanes y campos dunares barjánicos** (vientos predominantes) (D* y H)

II.- CONTROLADAS POR EL RELIEVE

1.- Formas tabulares
- **dunas remontantes** ["climbing dunes"]
  - bajo ángulo (<35°) (D y H*)
  - alto ángulo (>35°) (D y H*)
- **dunas colgadas** ["cliff-top dunes"] (M* y D)
- **dunas descendentes** ["falling dunes"] (M* y D)

2.- Formas transversales
- **dunas envolventes** ["wrap-around dunes"] (d* y M)
- **dunas eco** (d* y M)

3.- Formas mixtas
- **dunas paraboloides** (vientos intensos unidireccionales, parcialmente controladas por la vegetación) (H)
- **dunas barjanoideas** (vientos intensos unidireccionales) (H)

ESCALA DE TAMAÑOS

d = decimétrica
M = métrica
D = decamétrica
H = hectométrica
K = kilométrica

* predominante

B) DUNAS MIXTAS (TIPOLOGÍAS EROSIVAS Y DEPOSICIONALES)

I.- NO CONTROLADAS POR EL RELIEVE

1.- Formas simples
- **cuencas de deflación** ["deflation basins"] (vientos intensos) (H)

2.- Formas mixtas
- **casquetes o depresiones erosivas** ["blowouts"] (uno o varios vientos intensos)
  - semicirculares o elípticos (M y D*)
  - elongados (D y H*)
- **parabólicas o dunas con forma de U** (vientos intensos unidireccionales, parcialmente controladas por vegetación) (H)

C) DUNAS EROSIVAS

I.- NO CONTROLADAS POR EL RELIEVE

1.- Formas simples
- **casquetes o depresiones erosivas** (uno o varios vientos intensos) – semicirculares o elípticos (M y D*)
- **geometrías residuales**
  - pináculos piramidales "knobs" (oleajes y/o vientos) (M)
  - prismas longitudinales (vientos) (D y H)

Entre esta variedad de clasificaciones de tipos dunares costeros, en este manual se seguirá una clasificación simple, que reconoce cuatro tipos principales: primer cordón o anteduna, casquetes o depresiones eólicas, dunas parabólicas y mantos dunares transgresivos (ver figura 2.3.7). De estos tipos, el que es objeto de este manual es el primer cordón costero. El primer cordón costero o anteduna, se define como un depósito de arenas paralelo a la costa, convexo, de simétrico a asimétrico. Es el primer cordón formado en playa alta por acumulación por el viento de arena eólica con vegetación. Incluye dunas incipientes o embrionarias, primera duna estable y cordones relictos que fueron primeros cordones. Las dunas parabólicas y las depresiones son propias de zonas con alta intensidad de viento e intenso transporte de arenas. Las depresiones ocurren cuando se destruye la vegetación, progresando el aporte de arenas hacia el interior, pudiendo dar lugar a la formación de las dunas parabólicas con forma de U o V, que avanzan hacia el interior. Los campos y mantos dunares transgresivos se forman cuando se produce un ingente transporte de arenas hacia el interior por fuertes regímenes de vientos. Suelen estar desprovistos de vegetación.

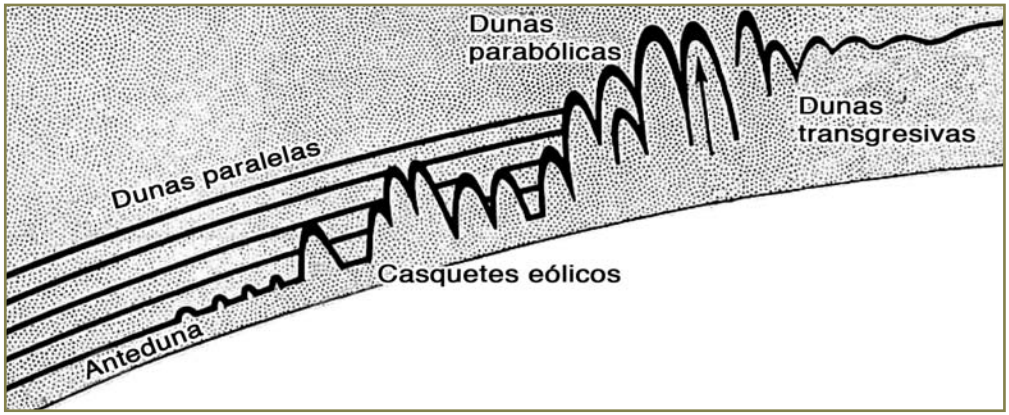


Figura 2.3.7. Tipos de dunas costeras. Bird, E.C.F. (1990).

2.3.6. Dinámica dunar

2.3.6.1. Introducción

La iniciación, desarrollo y morfología de equilibrio de todas las dunas está determinada por los cambios en las tasas de transporte de sedimentos en el tiempo y en el espacio que dan lugar a

erosión y sedimentación. Los esquemas de erosión sedimentación local pueden ser determinados en términos de la ecuación de continuidad del sedimento. Los mismos principios pueden ser aplicados a dunas completas y a campos completos de dunas, para examinar su dinámica en términos de balances sedimentarios. La ecuación de continuidad del sedimento:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{dq_{si}}{dx_i}$$

donde $h(x_i; t)$ es la elevación de la superficie, x_i (i=1, 2) son las coordenadas horizontales y $qsi(x_i; t)$ es la tasa de transporte en la dirección x_i.

Como puede verse en la ecuación de continuidad, los cambios espaciales en la tasa de transporte de sedimentos son fundamentales para controlar la morfología de las dunas. En las áreas donde el viento cambia estacionalmente, los patrones de erosión y sedimentación cambian con las estaciones. Por otro lado, el desarrollo de la duna modifica la estructura del viento alrededor de ella, estableciéndose un equilibrio dinámico entre la morfología de la duna y el flujo local del viento.

2.3.6.2. Iniciación de las dunas

Los procesos de iniciación de las dunas están todavía pobremente entendidos y analizados. La formación de dunas implica la sedimentación local que dé lugar a la formación de una forma de lecho que se propaga con el viento. La sedimentación implica una reducción local del caudal de transporte, la cual se puede producir por una convergencia de las líneas de corriente detrás de un obstáculo, por una disminución de la velocidad del viento debido a un aumento de la rugosidad del lecho (por ejemplo, por la presencia de vegetación) o por variaciones de la micro-topografía (cambios de pendiente, formas de lecho relictas, etc.).

Los vórtices que se generan tras los obstáculos dan lugar a formas de diferentes escalas como las dunas sombra, generadas a sotavento de piedras o vegetación o a formas mayores como las venas arenosas observadas a sotavento de los cráteres en Marte. Algunos autores han sugerido que las dunas lineales pueden generarse a partir de un núcleo de duna sombra. Grandes obstáculos como escarpes o colinas aisladas pueden dar lugar también a la formación de dunas lineales en la zona de sotavento. Estas dunas pueden romperse en barjanes aislados una vez que cesa la influencia del obstáculo.

Kocurek *et al.*, (1992) han documentado la iniciación y el crecimiento de dunas en Padre Islands, Texas. El inicio de formas de lecho tiene lugar cuando las velocidades del viento se

reducen entre un 37 % y un 86 % de los valores a barlovento de la zona de inicio debido a cambios en la rugosidad aerodinámica o micro-topografía producidos por zonas con vegetación, depresiones de erosión, topografía dunar relicta, o dunas sombra. No todos los sitios con sedimentación inicial desarrollan dunas, pero su crecimiento se ve favorecido por una mayor tasa de sedimentación y por un incremento de la aportación de arena. Muchas protodunas pequeñas pierden arena con vientos fuertes y algunas son eliminadas totalmente. Kokurek *et al.*, (1992) propone cinco etapas en la iniciación y desarrollo de las dunas con una evolución progresiva de la cara de sotavento y el desarrollo de un flujo secundario con expansión y separación, (ver figura 2.3.8).

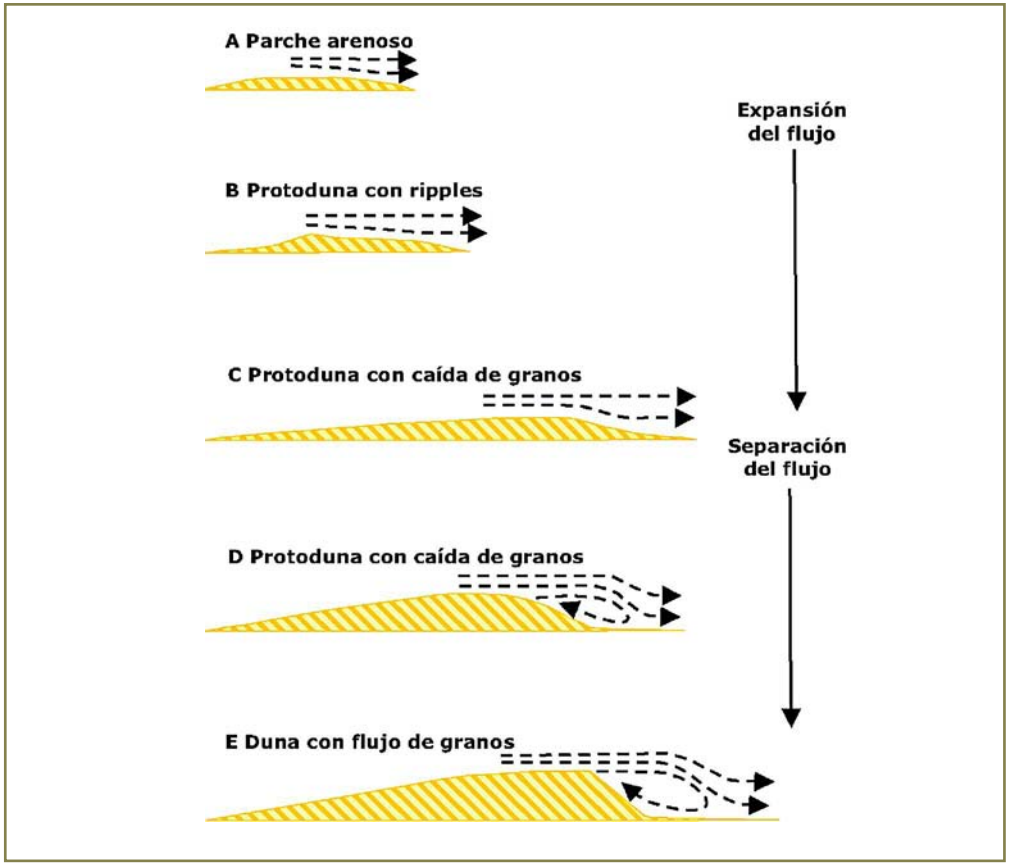


Figura 2.3.8. Etapas de la iniciación de dunas. Modificada de Kocurek et al., 1992.

1) Formación de parches irregulares de arena seca de unos pocos cm de altura,

2) Desarrollo de protodunas de 0.1 a 0.35 m de altura con ripples en toda su superficie,

3) Incremento del tamaño de las protodunas a 0.25 a 0.40 m de altura con caída de granos en la pendiente de sotavento e inicio de la divergencia de las líneas de corriente a sotavento,

4) Barjanes de 1 a 1.5 m de altura con separación del flujo y caída de granos en la pendiente de sotavento y

5) Líneas de dunas crecientes de 1 a 2 m de altura. Las dunas en fase de desarrollo se caracterizan por tener una pendiente de barlovento mayor que la de sotavento. El cambio de la expansión del flujo a la separación se produce cuando la pendiente de sotavento excede los 22º.

Una vez que las dunas alcanzan los estadios 4 y 5, la evolución subsiguiente tiene lugar por soldadura, separación, unión lateral y fusión de dunas. El crecimiento de las dunas es a expensas de las áreas interdunares y el esquema evoluciona hasta que la relación altura/separación (peralte) tiende a 1/20.

Este proceso de crecimiento de las dunas puede verse alterado por la presencia de la vegetación, obstáculos y otros factores como los indicados en el apartado 2.3.2.

2.3.6.3. Construcción de las dunas costeras

Las dunas costeras comienzan a formarse en la zona de playa seca, la franja de playa que se encuentra libre del oleaje y de las mareas vivas, de costas progradantes siguiendo un proceso que incluye las siguientes fases: 1) Se produce la germinación de semillas o se desarrollan fragmentos de plantas, como rizomas o estolones, que han sido depositados por las mareas o el viento, procedentes de otros sectores costeros o de dunas más interiores del mismo sector; 2) Los granos de arenas que se desplazan por saltación por la playa son interceptados por la estructura aérea de la vegetación y comienzan a acumularse formando pequeños montículos que crecen a medida que crece la planta sobre la que se forman. 3) Cuando la abundancia de vegetación es alta, los montículos que se han formado se unen durante su crecimiento y forman una pequeña duna de generalmente 50-100 cm de altura, denominada *duna embrionaria o incipiente*. Si la abundancia de vegetación en la playa alta es baja, el grado de desarrollo de la duna embrionaria será menor, no llegándose a formar un cordón linear continuo, sino una zona de montículos aislados o *nebkas*. Una *nebka* es una duna discreta formada alrededor

de una planta Nickling and Wolfe, (1994). Los materiales inertes como basuras de todo tipo, maderos, restos de embarcaciones, etc, transportados por el oleaje a la parte alta de la playa por los temporales, son también capaces de acumular arenas al servir de obstáculo al transporte de arenas por el viento, si bien son formaciones que no crecen una vez se ha enterrado el obstáculo. Estos depósitos pueden aportar materia orgánica que sirva para el posterior crecimiento de la vegetación.

La formación de la duna costera continuará hasta que, o bien el sector de costa deje de ser progradante, o bien comience a formarse una nueva duna embrionaria. En ambas situaciones el resultado será una disminución del aporte de arenas dejando de crecer el cordón dunar en altura y anchura Hesp y Martínez (2007). En el último caso, se produce una sucesión de cordones dunares separados por depresiones característica de numerosos sistemas dunares costeros y que refleja la cronosecuencia de formación de los mismos.

2.4 Parámetros sedimentológicos

2.4.1. Introducción

La fuente fundamental de arena de las dunas costeras es el sedimento arenoso transportado por el oleaje hacia la playa, el cual está íntimamente relacionado con el balance sedimentario de la misma. Desde un punto de vista global, la disponibilidad de sedimento es máxima en las costas afectadas por las glaciaciones, donde las fluctuaciones del nivel del mar han permitido el transporte del material de la plataforma continental hacia la costa y donde la erosión costera provee de abundante material arenoso, en la actualidad.

Las dunas son también numerosas en las desembocaduras de los ríos y en las bocanas de los estuarios, donde existe disponibilidad de sedimento y capacidad de transporte hidráulico y en las barras litorales de costas bajas. Incluso en los húmedos trópicos existen importantes campos de dunas costeras hasta el extremo que, en algunas islas tropicales, son el único relieve que sobresale del agua.

En este apartado se describen las características físicas de la arena de los campos dunares relativo a la composición, color, forma de los granos y granulometría.

2.4.2. Composición

La arena de la dunas costeras comprende una variedad de granos de minerales: cuarzo, feldespato, partículas calcáreas (foraminíferos, pedazos de conchas y coral) pequeñas cantidades de mine-

rales de metales pesados y en las costas volcánicas, basaltos, andesitas, pumitas y otras rocas volcánicas. El requerimiento básico es la existencia de partículas con el equivalente hidráulico de granos redondeados de cuarzo en el rango de tamaños de 2 a 0,1 mm con densidad 2650 g/m^3.

2.4.3. Color

El color de las arenas de las dunas costeras oscila desde los amarillentos de las arenas cuarcíferas a los blanquecinos de las arenas coralinas de base caliza. En las zonas volcánicas, las arenas son grises o negras, debido al color de las rocas volcánicas de las que proceden. El color amarillento de las arenas cuarcíferas es consecuencia del precipitado de óxidos de hierro en los recovecos de los granos. Como esta precipitación se produce en la duna, las arenas dunares suelen tender a oscurecerse a medida que se encuentran más alejadas de su origen en la playa.

2.4.4. Forma de los granos

Dada la procedencia marina de la arena, la fracción gruesa de las dunas costeras (por encima de los 0,5 mm) suele estar compuesta de granos bien redondeados. Sin embargo, por debajo de los 0,25 mm, los granos apenas sufren abrasión. Dado que la fracción arenosa dominante en las dunas es la comprendida entre los 0,125 y 0,250 mm, la mayoría de los granos en las dunas oscilan entre sub-angulares a sub-redondeados.

Si se observa la superficie de los granos de arena de las dunas al microscopio se pueden encontrar algunas formas características como: 1) redondeo de los bordes, 2) placas invertidas resultantes de la rotura del cuarzo a lo largo de los planos de fractura de la estructura cristalina, 3) depresiones alargadas resultantes de la fractura en concha debida a la colisión entre granos, 4) superficies lisas debidas a la disolución y re-precipitación de la sílice y 5) fracturas arqueadas resultantes de las colisiones y/o desgaste.

2.4.5. Distribución granulométrica

Los geomorfólogos miden el tamaño de las arenas en unidades ϕ, mientras que los ingenieros de costas utilizan los milímetros (mm) o las micras (μm). La relación entre las unidades ϕ y los mm para el tamaño del grano viene dada por la expresión:

$$\phi = -\frac{\log(mm)}{\log(2)} \Rightarrow mm = 2^{-\phi}$$

La mayoría de las dunas costeras está formada por arenas finas a medias (tamaño medio 1.60 a 2,65ϕ, equivalente a 330 a 160 µm) y muy bien a moderadamente clasificadas (desviación estándar 0,26 a 0,55ϕ, ver tabla 2.4.1), aunque existe un rango bastante amplio dentro de una misma duna y entre dunas de diferentes costas.

Los depósitos de ripples tienden a ser relativamente más gruesos y peor clasificados que el resto de los depósitos de duna porque contienen granos que han sido transportados tanto por saltación como por reptación. Los depósitos de caída de granos (que se depositan en la cara de sotavento) suelen ser los más finos y mejor clasificados, ya que están compuestos sólo por granos transportados por saltación.

Los depósitos de flujo de granos suelen ser ligeramente más gruesos y peor clasificados que los depósitos de caída de granos porque han sido re-trabajados por la avalancha, la cual lleva los granos gruesos a la superficie. Estos granos más gruesos pueden rodar después por la cara de avalancha para acumularse en la base de la misma. Las variaciones en la distribución espacial de estos tipos de depósito eólico en las dunas, junto con los cambios en la efectividad de los procesos de saltación y reptación sobre las pendientes, dan lugar a la aparición de los patrones de los parámetros de tamaño de grano y a una clasificación que reflejan la acción de los procesos de transporte de arena en las dunas.

Los parámetros de la distribución del tamaño más utilizados son el tamaño medio, la desviación estándar y el sesgo o asimetría de la distribución. Cuando la distribución de tamaños se establece en unidades ϕ un sesgo positivo indica la existencia de una cola de granos finos (tamaño medio menor que la mediana) mientras que un sesgo negativo es indicativo de una cola de granos gruesos (tamaño medio mayor que la mediana).

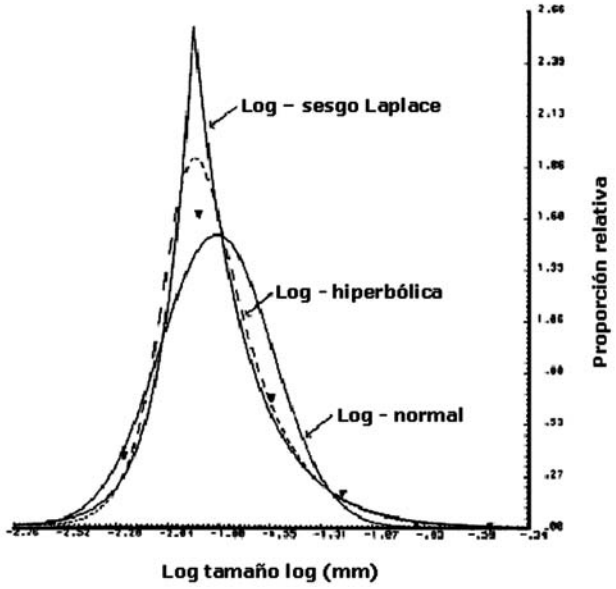
Tabla 2.4.1. Terminología de la estadística gráfica de la clasificación y el sesgo de las arenas. Fuente: Folk and Ward, 1957.

CLASIFICACIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN UNIDADES Ø	SESGO	SESGO EN UNIDADES Ø
Muy bien clasificada	> 0,35	Sesgo muy positivo	+1,0 a +0,3
Bien clasificada	0,35 a 0,50	Sesgada positivamente	+0,3 a +0,1
Moderadamente bien clasificada	0,50 a 0,70	Simétrica	+0,1 a -0,1
Moderadamente clasificada	0,70 a 1,00	Sesgada negativamente	-0,1 a -0,3
Mal clasificada	1,00 a 2,00	Sesgo muy negativo	-0,3 a -1,0
Muy mal clasificada	2,00 a 4,00		

La función más utilizada para representar la distribución de tamaño del grano es la log-normal, aunque recientemente se ha propuesto la utilización de la distribución log-hiperbólica, Barndorff-Nielsen *et al.,* 1982, (ver Tabla 2.4.2.), de la que la lognormal es una expresión asintótica cuando $\phi = \gamma y \delta \rightarrow \propto$ mientras $\delta\sqrt{(\phi\gamma)} \rightarrow \sigma^2$. Otra distribución también utilizada es la log-sesgo Laplace, que también es expresión asintótica de la log-hiperbólica cuando $\delta \rightarrow 0$.

Tabla 2.4.2. Funciones de densidad más utilizadas para la distribución del tamaño de grano en dunas.

DISTRIBUCIÓN	FUNCIÓN DE DENSIDAD
Log-normal	$g(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right\}$
Log-hiperbólica	$g(x;\phi,\gamma,\delta,\mu) = \frac{\sqrt{\phi \cdot \gamma}}{\delta \cdot (\phi+\gamma) \cdot B_3\left(\delta\sqrt{\phi \cdot \gamma}\right)} \cdot \exp\left\{-\left[(\phi+\gamma) \cdot \sqrt{\delta^2 + (x-\mu)^2} + (\phi-\gamma) \cdot (x-\mu)\right]/2\right\}$ donde B_3 es la función de Bessel modificada de tercer orden y $\phi,\gamma,\delta > 0$
Log-sesgo Laplace	$g(x;\alpha,\beta,\mu) = \begin{cases} (\alpha+\beta)^{-1} \cdot \exp\{(x-\mu)/\alpha\} & x \le \mu \\ (\alpha+\beta)^{-1} \cdot \exp\{(x-\mu)/\beta\} & x > \mu \end{cases}$



2.5 El transporte eólico

2.5.1. Introducción

Las variaciones espaciales y temporales en las tasas de transporte de arena constituyen un factor determinante de la morfología y dinámica dunar. Por esta razón, es importante la comprensión de los principios que gobiernan el transporte de la arena por el viento antes de examinar los procesos que intervienen en la dinámica dunar. Se pueden distinguir tres tipos diferentes de movimiento en el transporte eólico, que dependen principalmente del tamaño de grano del material disponible (ver Tabla 2.5.2).

2.5.2. El viento superficial

La circulación del aire es casi siempre turbulenta y consiste en remolinos de diferentes escalas que se mueven con diferentes velocidades y direcciones. Dichos remolinos turbulentos transfieren cantidad de movimiento por medio de procesos de mezcla turbulenta entre las diferentes capas del fluido, de manera que cada capa tiene diferente dirección y velocidad media. Debido a la fricción con la superficie, la velocidad en las proximidades de ésta disminuye. Cuando las partículas o las formas de la superficie tienen una rugosidad superior a 80 μm la superficie se considera aerodinámicamente rugosa. En estas condiciones, se forma en las proximidades de la superficie una subcapa viscosa cuyo perfil no está bien descrito todavía. En condiciones de estabilidad atmosférica, el *perfil de velocidad* por encima de esta subcapa viscosa de las superficies aerodinámicamente rugosas viene dado por la ecuación de Prandtl-von Karman:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad (1)$$

donde u es la velocidad media del viento a la altura z, z_0 es la longitud de rugosidad superficial, u^* *es la velocidad de corte o fricción* y $\kappa \cong 0.4$ es la constante de von Karman. En estas condiciones, si se representa la velocidad del viento en el eje z logarítmico el perfil resultante es una recta que intercepta al eje z a la altura z_0. Con este modelo todos los perfiles convergen en $(0, z_0)$, independientemente de la velocidad del viento. Esto quiere decir que u^* a una determinada altura z aumenta al incrementar la velocidad del viento.

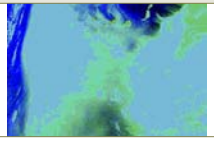
Tabla 2.5.1. Valores típicos de la longitud de rugosidad de varias superficies. Fuente: Blumberg and Greeley, 1993.

Tipo de superficie (m)	Altura de rugosidad aerodinámica z_0
Playas	0.00008 - 0.00013
Conos aluviales	0.00076 - 0.00310
Flujos de lava	0.00132 - 0.07351

En superficies formadas por arena, *la longitud de rugosidad* z_0 es aproximadamente 1/30 del tamaño medio de los granos. En superficies más rugosas, la longitud de rugosidad también varía con la forma y la distancia entre las diferentes partículas. En la tabla 2.5.1, se presentan algunos valores típicos de la longitud de rugosidad de varias superficies. Cuando la superficie está cubierta por vegetación o por gran cantidad de otros elementos de mayor rugosidad, el punto donde la velocidad del viento se anula ya no es la superficie del suelo, sino que se desplaza hasta una altura que depende de la altura, densidad, porosidad y flexibilidad de los elementos de rugosidad. Esta nueva altura se denomina *altura de desplazamiento del plano cero*, *d*. En estas condiciones, el perfil del viento se representa por:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \qquad (2)$$

Tabla 2.5.2. Modos de transporte eólico.

MATERIAL	TAMAÑO (μm)	MODO DE TRANSPORTE EÓLICO	DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO	
Polvo	< 60 - 70	Suspensión	Viajan en suspensión grandes distancias acompañando los remolinos turbulentos de la capa límite atmosférica. Su papel en la dinámica de dunas es insignificante.	
Arena fina media	60 - 500	Saltación y reptación	**Saltación:** Modo de transporte dominante en los sistemas dunares. Trayectorias parabólicas con fuertes ángulos de salida y ángulo suave de caída. **Reptación**: movimiento de las partículas adyacentes a las partículas que sufren impacto de los granos en saltación.	
Arena gruesa	> 500	Deslizamiento	Las partículas demasiado pesadas para saltar se mueven por deslizamiento o rodadura sobre la superficie debido al impacto de los granos en saltación. También afecta a las partículas menores menos expuestas	

La velocidad de fricción u^* es proporcional a la pendiente del perfil vertical de velocidades en una escala logarítmica estando relacionada con la *tensión de corte* τ en la superficie y con la densidad del aire, ρ_a mediante la expresión:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \qquad (3)$$

Estas relaciones son representativas del perfil de velocidades para condiciones atmosféricas neutras. Si la atmósfera es inestable, el gradiente vertical de velocidad varía ligeramente con la altura, por lo que se incrementa la tensión de corte en la superficie. En condiciones estables, la tensión de corte en la superficie disminuye. Las variaciones topográficas también producen efectos importantes en los perfiles de velocidad del viento, debido a la convergencia y divergencia de las líneas de corriente, de manera que la variación topográfica debida a la existencia de las dunas modifica el perfil del viento, por lo que los modelos anteriores no pueden ser aplicados en dichas situaciones al dejar de ser log-lineales los perfiles.

2.5.3. Puesta en movimiento de la arena por el viento

2.5.3.1. El umbral de inicio del movimiento

Los granos de arena comenzarán a moverse cuando las fuerzas ejercidas por el fluido (arrastre y sustentación) superen el efecto del peso y de la cohesión entre partículas adyacentes. Las fuerzas de sustentación son el resultado de la disminución de la presión del fluido sobre la cara superior de los granos y del fuerte gradiente de velocidades horizontales en las proximidades de la superficie del grano. El peso y la cohesión de las partículas están relacionados con las propiedades físicas de las mismas, como son el tamaño, densidad, mineralogía, forma, empaquetamiento, contenido en humedad y la presencia o no de agentes adhesivos, como sales solubles.

Cuando la velocidad de corte sobre la partícula aumenta, las fuerzas de elevación y arrastre sobre la partícula aumentan hasta que se alcanza un umbral a partir del cual se inicia el movimiento del grano. Dicho umbral se denomina *velocidad de corte de inicio de movimiento* u_{*t} (Bagnold, 1941) dado por:

$$u_{*t} = A \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot D} \qquad (4)$$

donde A es un coeficiente empírico que depende de las características del grano (A ≅ 1 para partículas del tamaño de las arenas) y D es el diámetro de las partículas.

Una vez que los granos son levantados, siguen una trayectoria parabólica durante la cual son acelerados horizontalmente absorbiendo cantidad de movimiento del viento hasta que vuelven a impactar sobre la superficie. En el impacto, transmiten su cantidad de movimiento a otros granos que a su vez pueden salir despedidos al aire aunque en dichos granos no se haya alcanzado la velocidad de fricción crítica. Esto quiere decir que, una vez iniciado el movimiento, el umbral de velocidad crítica de inicio de movimiento dado por (4) disminuye, correspondiéndole al coeficiente A un valor de 0,08.

2.5.3.2. Procesos de despegue de los granos

Bagnold (1941) sugirió que una vez alcanzada la velocidad de corte de inicio de movimiento, los granos de arena comienzan a rodar o a deslizarse sobre la superficie por la presión directa del viento. Una vez que las partículas adquieren velocidad, empiezan a saltar sobre la superficie quedando expuestas a la acción del viento iniciándose el proceso de saltación. Un análisis meticuloso del inicio del movimiento de los granos muestra que no es necesario que los granos empiecen a rodar o a deslizar para que se produzca la saltación, sino que las diferencias de presión en la superficie, actuando como fuerzas de sustentación, son suficientes para levantar directamente los granos. A medida que aumenta la velocidad del viento, las partículas comienzan a vibrar hasta que repentinamente se levantan de la superficie. El impacto de la caída de estos granos acelerados en el aire hace saltar a otros en un efecto cascada, de manera que el número de granos en movimiento se incrementa exponencialmente. Como los granos puestos en el aire extraen cantidad de movimiento del mismo, se produce una reducción de la velocidad del viento en las proximidades de la superficie, por lo que llega un momento en que se alcanza un equilibrio denominado estado de saltación estacionario. Este equilibrio inicial entre el viento y los granos puestos en saltación se alcanza rápidamente en 1 ó 2 segundos; el perfil del viento se ajusta después más lentamente a las nuevas condiciones de rugosidad de la superficie en un período de tiempo de varias decenas de segundos. Dadas las fluctuaciones del viento en la superficie, es muy raro que las condiciones de perfecto equilibrio se puedan alcanzar en la naturaleza.

2.5.3.3. Efectos de las condiciones de la superficie en el despegue de los granos

La velocidad de fricción de inicio de movimiento se puede definir con bastante precisión para granos uniformes de tamaño superior a 100 μm. Sin embargo, las arenas naturales contienen granos con rangos variables de tamaños, formas, cohesión y grado de compactación. Como

resultado, los umbrales de inicio de movimiento deben ser considerados como una función de las anteriores variables. Además, otros factores como la clasificación de las arenas, la pendiente o el grado de humedad de la superficie, desempeñan un importante papel en el proceso de transporte. En la Tabla 2.5.3, se presentan los efectos de algunos de estos factores.

2.5.4. Procesos de despegue de los granos

El proceso del transporte de arena por el viento puede ser visualizado como una nube de granos saltando sobre la superficie. Durante el vuelo, los granos toman cantidad de movimiento del viento, parte de la cual es transferida a los granos de la superficie en el aterrizaje y otra parte de la misma permite a los granos despegar de nuevo, repitiendo el proceso en lo que se denomina "saltación sucesiva". Los granos impactados en la superficie también experimentan saltos de pequeña altura y avances en su posición por medio de un movimiento cercano a la superficie que se denomina "reptación". Los granos que saltan rebotan con el 50-60 % de la velocidad de aterrizaje. Por otro lado, los granos impactados alcanzan solamente alrededor de un 10% de la velocidad del grano que impacta. La reacomodación de los granos que tiene lugar en el lecho debido a la saltación genera un desplazamiento sin despegue de los granos de la superficie denominado "arrastre superficial".

2.5.4.1. Trayectorias de saltación

Las partículas que se mueven por saltación se caracterizan por seguir trayectorias con un ángulo de despegue prácticamente vertical seguido de una trayectoria parabólica tal que impactan sobre la superficie con ángulos muy bajos.

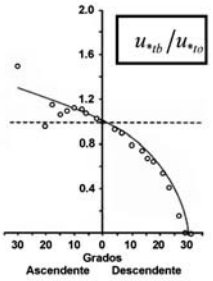
La trayectoria de los granos que saltan se produce en función de cuatro fuerzas: 1) gravedad, 2) arrastre hidrodinámico, 3) efecto Magnus, debido a la rotación de los granos y 4) fuerza de sustentación. Los ángulos de despegue son como media de 50º. Como el gradiente vertical del viento en las proximidades de la superficie es muy fuerte, cuanto más arriba salta la partícula, mayor es la velocidad a la que será transportada por el viento, dando lugar a trayectorias más largas. Una vez que las partículas han alcanzado su máxima altura, descienden en una trayectoria parabólica muy lineal, impactando con la superficie con un ángulo promedio de unos 14º (rango entre 4º y 28º). El ángulo de impacto disminuye al aumentar la velocidad del viento y el tamaño de las partículas. Asimismo, la forma de los granos es de gran importancia en la trayectoria de saltación y en la naturaleza de las colisiones en la superficie. Los granos aplanados tienden a saltar en trayectorias más bajas y largas comparadas con las trayectorias de las partículas redondeadas y la colisión es más eficiente en el mantenimiento del proceso de saltación en el caso de partículas compactas.

Tabla 2.5.3. Factores que influyen en la velocidad de corte de inicio de movimiento.

Velocidad de corte de inicio de movimiento, Bagnold (1941), ecuación (4):

$$u_{*t} = A \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot D}$$

A ≈ 0,1 (Inicio del transporte)
A ≈ 0,08 (Transporte establecido)

Efecto de la clasificación de las arenas	Las arenas poco clasificadas dan lugar a una superficie aerodinámicamente más lisa, al encajarse los granos pequeños entre los grandes. El resultado es un aumento del valor del coeficiente A.
Efecto de la pendiente local de la superficie	Las pendientes ascendentes aumentan ligeramente el valor de u_{*t}, las pendientes descendentes disminuyen notablemente el valor de u_{*t}.
	Figura: Relación entre la velocidad de corte umbral de inicio de movimiento (u_{*t}) y la pendiente de la superficie. Círculos: Medidas de campo; línea continua: relación teórica determinada por Dyer (1986). u_{*tb}/u_{*t0} es la relación entre la velocidad de fricción umbral de inicio de movimiento en la pendiente u_{*tb} y en superficie horizontal, u_{*t0}. Hardisty and Whitehouse, 1988a. 
Efecto del contenido de humedad	Las fuerzas capilares entre los contactos de los granos húmedos aumentan la cohesión de la arena ⇒ >u_{*t}. w = 0,6 % ⇒ $u_{*tw} = 2u_{*t0}$ en arenas de tamaño medio. w > 5 % ⇒ arena inamovible por la mayoría de los vientos naturales. Belly (1964): $u_{*tw} = u_{*t} \cdot (1{,}8 + 0{,}6 \cdot \log_{10} w)$
Efecto de sustancias adhesivas y costras superficiales	Agentes adhesivos: lodos, arcillas, materia orgánica o sales solubles precipitadas. Pequeñas cantidades de sales solubles (especialmente cloruro sódico) ⇒ > u_{*t}. El impacto de gotas de lluvia, algas y hongos pueden formar costras superficiales ⇒ >u_{*t}.
Efecto de la rugosidad de la superficie	Vegetación, gravas, etc. absorben una porción de la tensión de corte, protegiendo la superficie erosionable que queda debajo. El grado de protección = f(tamaño, geometría y espaciado horizontal). Si el espaciado horizontal es elevado, u_{*t} disminuye debido a que se forman vórtices alrededor de las partículas que favorecen el despegue de los granos menores. Por el contrario, si el espaciado horizontal de los elementos de rugosidad es pequeño, la u_{*t} aumenta debido a la protección que ofrecen los elementos mayores de rugosidad.

2.5.4.2. Modificación del viento superficial por los granos en saltación

Cuando la velocidad de fricción del viento es suficiente para iniciar el proceso de saltación, el perfil del viento cercano a la superficie se ve alterado debido a que los granos de arena que han entrado en saltación captan cantidad de movimiento del viento, produciendo una desaceleración del mismo. Además, la tensión tangencial del viento se ve modificada por los granos de forma que deja de ser constante con la altura. El perfil de velocidades en la capa de saltación deja de ser logarítmica. Bagnold (1941) demostró que la distribución de velocidades con la altura continúa siendo recta (en eje vertical logarítmico) pero los perfiles tienden a converger en un punto (foco) z'_0 situado a una altura de 0,2 a 0,4 cm sobre la superficie. Por debajo de este punto de convergencia, el perfil deja de ser logarítmico y la velocidad del viento en dicha zona puede decrecer a medida que u* aumenta. El foco, z'_0 puede representar la altura media de saltación de granos de granulometría uniforme. Owen (1964) planteó que de que la capa de saltación actúa incrementando la rugosidad aerodinámica en una cantidad relacionada con la velocidad de despegue de los granos, por lo que la rugosidad aparente del lecho, z'_0 depende de u_* durante el transporte según la expresión:

$$z_0' = \alpha \cdot \frac{u_*^2}{2 \cdot g} \qquad (5)$$

siendo α un valor empírico obtenido en experimentos realizados en túnel de viento y de magnitud igual a 0,02.

2.5.4.3. La capa de saltación

La mayor parte del sedimento en la nube de granos en saltación y reptación se transporta muy cerca de la superficie, con una disminución exponencial del flujo de masa exponencial con la altura. Sobre superficies constituidas por arena, la mayoría de los granos viajan en la capa situada a 1 ó 2 cm sobre la superficie. Sin embargo, esta altura aumenta cuando el transporte de arena se produce sobre superficies cubiertas con gravas. En cualquier caso, el tamaño del sedimento transportado a una determinada altura tiende a aumentar con la velocidad de corte u_*.

2.5.5. Ecuaciones del transporte eólico de la arena

El trabajo de Bagnold (1941), en el que se relacionaba la cantidad de arena transportada con la tensión de corte ejercida por el viento, constituye la base teórica de partida de casi todas las investigaciones en el campo de la determinación de las tasas de transporte eólico. Siguiendo el trabajo de Bagnold, otros investigadores han desarrollado ecuaciones teóricas y empíricas para la descripción del transporte de sedimento por el viento (ver Tabla 2.5.4).

Un problema fundamental con la ecuación original de Bagnold es que no incluye un término umbral y que por lo tanto, predice transporte de sedimento con velocidades de corte por debajo de las requeridas para el inicio del movimiento de las partículas. Por ello, Bagnold (1956) modificó su ecuación para incluir dicho término. Antes de ello, Kawamura (1951) propuso una ecuación ligeramente diferente que ya incluía una velocidad de corte umbral, u_{*t}.

2.5.6. Controles en las tasas de transporte de sedimentos

Las expresiones del transporte eólico presentadas en la Tabla 2.5.4 corresponden al caso de lechos horizontales de arena, no cementada, bien clasificada y seca. Al igual que ocurría con u_{*t}, la tasa de transporte también se ve modificada por estos factores. Su influencia es analizada en los siguientes apartados.

Tabla 2.5.4. Formulaciones de transporte de arena en dunas.

AUTOR	FORMULACIÓN	
O'Brien and Rindlaub (1936)	$G = 0{,}036 \cdot u_5^3$ *para* $(u_5 > 13{,}4 pies/s)$	G: transporte de sedimentos en libras que pasan por pie de anchura por día. u_5: Velocidad del viento en pies/s a una altura de 5 pies.
Bagnold (1941)	$q = C \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$ g/s/cm	d = Tamaño medio de la arena en mm D = 0,25 mm C = 1,5 para arenas uniformes, 1,8 para arenas de duna naturales, 2,8 para arenas mal clasificadas y 3,5 para gravas.
Kawamura (1951)	$q = K \cdot \frac{\rho_a}{g}(u_* + u_{*_t})^2 (u_* - u_{*_t})$ g/s/cm	K = 2,78 para arena moderadamente bien clasificada con d = 0,25 mm
Zingg (1952) (modificado de Bagnold)	$q = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{3/4} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$ g/s/cm	C = 0,83, D = 0,25 mm
Lettau and Lettau (1978)	$q = C \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{n} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^2 \cdot (u_* - u_{*_t})$ g/s/cm	C' = 4,2; n varía de 0,5 a 0,75
Hsu (1974)	$q = H \cdot \left(\frac{u_*}{\sqrt{g \cdot d}}\right)^3$ g/s/cm	$H = (-0{,}42 + 4{,}91 \cdot d) \cdot 10^{-4}$
White (1979)	$q = 2{,}61 \cdot u_*^3 \left(1 - \frac{u_{*_t}}{u_*}\right) \cdot \left(1 + \frac{u_{*_t}^2}{u_*^2}\right) \cdot \frac{\rho_a}{g}$ g/s/cm	

2.5.6.1. Efectos de la granulometría de la arena

La mayoría de las formulaciones de transporte contiene coeficientes empíricos que dependen del tamaño de grano y del tipo de clasificación del sedimento. Las diferencias en el transporte calculado con dichas ecuaciones pueden estar relacionadas con diferencias no documentadas en las características texturales, especialmente por la forma de los granos utilizados en los experimentos. El transporte de sedimentos se calcula como una potencia de la velocidad de corte, u* pero con exponentes considerablemente diferentes del valor 3 propuesto por Bagnold (1941) y otros. El valor del exponente y por lo tanto, del flujo de sedimentos, se incrementa con la esfericidad de los granos desde 2.76, para cuarcita triturada, hasta 3.42 para arena natural y 4.1 para esferas de vidrio (Willians, 1964). Este mismo autor también demostró que a bajas velocidades de corte (u_* <75 cm/s) hay una tendencia al incremento de la tasa de transporte a medida que los granos se hacen más irregulares.

2.5.6.2. Efectos del contenido en humedad

Como ya se ha indicado, el contenido de humedad afecta a la velocidad de corte umbral de inicio de movimiento. A medida que se incrementa la velocidad del viento, el efecto de la humedad se hace menos evidente, aunque las tasas de transporte son hasta un 25 % inferiores para una velocidad de fricción de 1 m/s. Comparaciones realizadas entre las tasas de transporte calculadas utilizando la formulación de Bagnold y datos de campo de migración en las dunas de la Costa de Oregón, indican que las tasas de transporte se ven reducidas hasta 1/3 en condiciones de humedad, Hunter *et al.*, (1983). En la figura 2.5.1, se presenta una aproximación a la tasa del transporte en condiciones de humedad, utilizando la formulación de Kawamura (1951) y el umbral de inicio de movimiento en condiciones de humedad de Hotta *et al.*, (1984). En cualquier caso, la naturaleza exacta de las relaciones entre el contenido de humedad y el transporte es todavía mal conocida y el papel ejercido por la evaporación en el proceso es incierto.

Una alternativa para la determinación del transporte bajo condiciones de humedad es la de proveer los límites superior e inferior al transporte, siguiendo Sherman *et al.*, (1995). El límite superior del transporte bajo condiciones de humedad se puede obtener utilizando el modelo de transporte de Kawamura (1951), (ver figura 2.5.1), que facilita un valor límite superior del transporte, modificado para arena húmeda por Hotta et al. (1984), que genera un valor conservador del efecto de la humedad:

$$q_w = C \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot \left(u_* - u_{*_t} - 7.5 \cdot w\right) \cdot \left(u_* + u_{*_t} + 7.5 \cdot w\right)^2 \qquad (6)$$

Como límite inferior del transporte bajo condiciones de humedad se puede utilizar una fórmula de transporte que facilita valores consistentemente bajos del mismo como la de Zingg (1952), (ver Tabla 2.5.4), con la corrección de humedad de Belly (1964), (ver Tabla 2.5.3), que produce valores elevados en la reducción del transporte por humedad, obteniéndose:

$$q_w = C \cdot \left(\frac{d}{D_w} \right)^{3/4} \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot u_*^3$$

$$D_w = \frac{u_{*t}^2 \cdot (1.8 + 0.6 \cdot \log_{10} w)^2}{A^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}} \qquad (7)$$

donde A viene dado en la expresión (4).

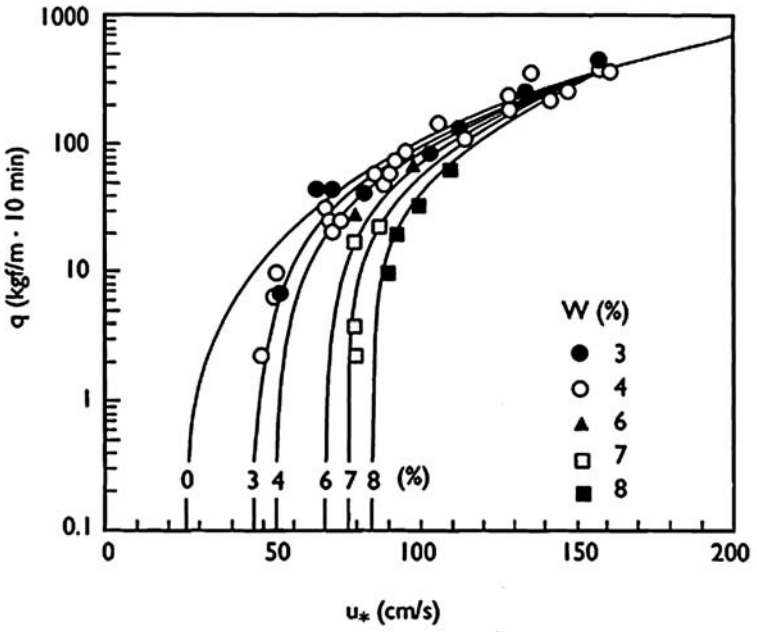


Figura 2.5.1. Relación entre el flujo de masa de sedimento y el contenido de humedad W. Modificada de Hotta et al., 1984.

2.5.6.3. Efecto de la vegetación

Los efectos de la vegetación en el transporte de sedimentos son todavía poco conocidos. Estudios empíricos indican que el transporte de sedimentos se produce con coberturas de vegetación de incluso el 45%. Una aproximación más rigurosa implica la evaluación de la distribución de la tensión tangencial del viento entre las plantas y la superficie de arena. En ausencia de grandes elementos de rugosidad, la tensión tangencial en la superficie se puede determinar a partir de la velocidad de corte, u., utilizando un perfil de viento log-lineal, ecuación (3):

$$\tau_s = \rho_a \cdot u_*^2 \qquad (8)$$

donde τ_s es la tensión de corte en la superficie. En el caso de superficies cubiertas con grandes elementos de rugosidad (caso de la vegetación), el perfil logarítmico no se extiende entre los elementos de rugosidad, por lo que el cálculo de la tensión tangencial en la superficie se hace imposible. En estas situaciones, la fuerza total, F, transmitida a la superficie es igual a la suma de las fuerzas sobre los elementos de rugosidad, F_r y sobre la superficie, F_g, de manera que:

$$F = F_r + F_g \qquad (9)$$

Stockton and Gillette (1990) demostraron que la tensión de corte total sobre una superficie cubierta con elementos de rugosidad podía ser repartida entre los elementos y la superficie de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{F_r}{A_s} + \frac{F_g}{A_g} \cdot \frac{A_g}{A_s} = \frac{F_r}{A_s} + \tau_g \cdot \frac{A_g}{A_s} \qquad (10)$$

donde F_r es la fuerza ejercida sobre los elementos de rugosidad, A_s es el área total de la superficie, A_g es el área de la superficie no cubierta por los elementos de rugosidad y τ_g es la tensión de corte sobre la superficie no cubierta por los elementos de rugosidad. La fracción de la fuerza total que se aplica sobre la superficie erosionable es:

$$1 - \left[\frac{F_r}{A_s \cdot \tau}\right] = \frac{\tau_g}{\tau} \cdot \frac{A_g}{A_s} = R^2 \cdot \frac{A_g}{A_s} \qquad (11)$$

donde R es la relación entre la velocidad de corte umbral de la superficie sin vegetación y la correspondiente con vegetación:

$$R = \frac{u_{*t}}{u_{*tv}} \qquad (5)$$

A_g/A_S es un factor que describe la proporción de superficie cubierta con sedimento susceptible de ser erosionado. El valor de R en función de la densidad y tamaño de la cubierta vegetal viene dado en función de la cobertura lateral, Lc [(1)], en la figura 2.5.2.

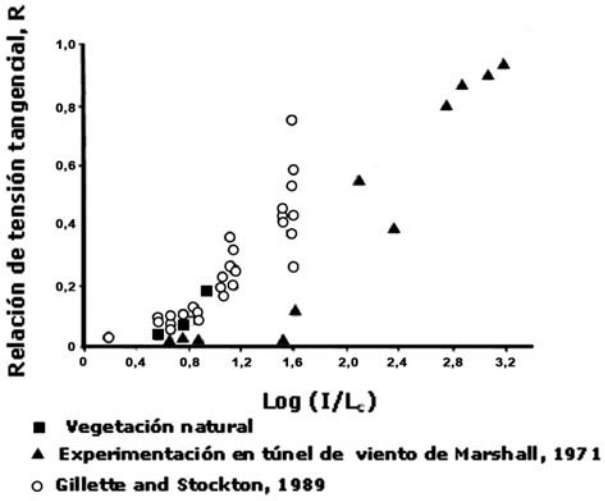


Figura 2.5.2. Relación entre la relación de tensión tangencial, R, y la cobertura lateral de vegetación, Lc. Modificada de N. Lancaster, 1995 (después de Musick and Gillette, 1990).

(1) Cobertura lateral, Lc (Clark and Shutler 1999): Porcentaje de obstrucción promedio de 5 bloques blanco de 6,5 cm2 colocados sobre un panel cuadrado negro cuando se observa desde los cuatro puntos cardinales desde una altura de 60 cm del suelo.

2.5.6.4. Efectos de los elementos de rugosidad

En el caso de una superficie no cubierta por vegetación y con elementos de rugosidad no erosionables, por ejemplo, una berma de playa parcialmente cubierta por conchas grandes, la relación entre las tasas de transporte y el tamaño, densidad y espaciado de los elementos de rugosidad está fuertemente influenciado por el efecto de la geometría de los elementos de rugosidad en el umbral de inicio del transporte. Greeley *et al.,* (1974) definieron dicho umbral mediante la expresión:

$$u_{*t}^2 = \frac{0{,}139 \cdot g \cdot D}{\left\{1 + 0{,}776 \cdot \left[\ln\left(1 + \frac{D}{z_0}\right)\right]^2\right\}} \qquad (6)$$

donde D es el diámetro de los granos que se transportan.

Por lo tanto, las tasas de transporte pueden ser mayores o menores en superficies con diferentes rugosidades, dependiendo de los valores relativos de u_*, u_{*t} y de la relación entre el diámetro de las partículas y z_0. Existe un fuerte incremento en el umbral de velocidad de corte de inicio de movimiento para partículas entre 100 y 200 μm. Greeley and Iversen (1987) sugirieron que el transporte tiene lugar sólo en superficies lisas a bajas velocidades del viento; a velocidades intermedias, el transporte tiene lugar en ambas superficies, con mayor transporte en las superficies lisas. Sin embargo, con altas velocidades del viento, el transporte es mayor sobre las superficies rugosas.

2.5.6.5. Efecto de las pendientes

La mayoría de las superficies existentes en las dunas no son horizontales, por lo que el efecto de la pendiente en las tasas de transporte es, potencialmente, muy importante. Bagnold (1956) demostró que la tasa de transporte en una superficie inclinada, q_i, es proporcional a:

$$q_i = \frac{q}{\cos\theta \cdot (\tan\alpha + \tan\theta)} \qquad (7)$$

donde q es la tasa de transporte sobre una superficie lisa horizontal, α es el ángulo de la pendiente con la horizontal y θ es el ángulo de rozamiento interno de la arena. Experimentos de

campo realizados por Hardisty and Whitehouse (1988a), (ver figura 2.5.3), demostraron que las tasas de transporte reales se desvían bastante de las teóricas dadas por la expresión (14) de Bagnold, sugiriendo un papel más importante de la pendiente que aumenta la tasa de transporte cuando el viento sopla pendiente abajo y la disminuye cuando lo hace pendiente arriba.

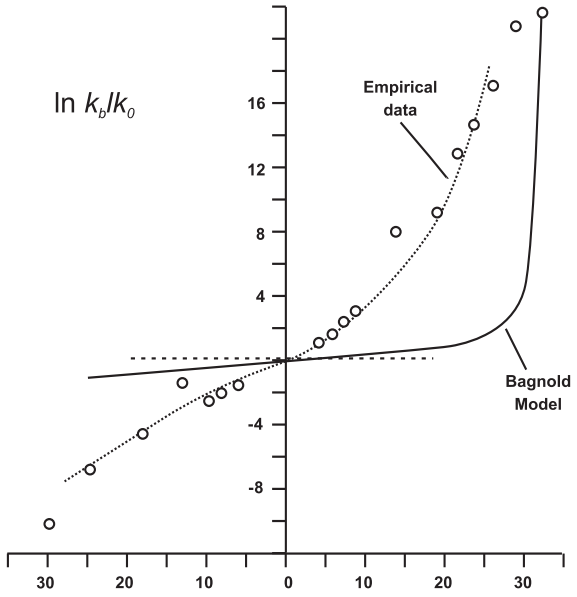


Figura 2.5.3. Relación entre el flujo de masa de sedimento y la pendiente. Modificada de Hardisty and Whitehouse (1988a).

2.5.7. Ripples de viento

Los ripples de viento (ver foto 2.5.1) pueden encontrarse en todas las superficies de arena excepto en aquellas en las que tiene lugar una rápida sedimentación. Los ripples son la respuesta inicial de la superficie al transporte de la arena por el viento y se forman porque las superficies lisas sobre las que se produce el transporte por saltación y reptación son dinámicamente inestables. La formación y movimiento de los ripples de viento están fuertemente ligados a los procesos de saltación y reptación.

Los ripples suelen formarse con sus crestas perpendiculares a la dirección del viento, aunque la pendiente de la superficie puede modificar su orientación. Como pueden formarse en cuestión de minutos, los ripples proveen información prácticamente instantánea de la dirección del viento y del transporte local. Los ripples de viento típicos tienen longitudes de onda que oscilan entre los 50 y 200 mm y una altura de 0,005 a 0,01 m. Su longitud y altura están relacionadas con el tamaño de los granos, su clasificación y la velocidad del viento, de manera que en arenas gruesas o gravilla (1 a 4 mm de tamaño medio) se pueden formar ripples con longitudes de onda de 0.5 a 2 m con alturas de 0.1 m o superiores. Para arena de un determinado tamaño la longitud de onda del ripple aumenta al incrementar la tensión de corte debida al viento. La mayoría de los ripples de viento son asimétricos en sección transversal, con una pendiente de barlovento ligeramente convexa y un ángulo de 8º a 10º y una pendiente de sotavento con pendiente variable entre 20º y 30º. En todos los casos la cresta de los ripples está formada por granos más gruesos que los del tamaño medio existente en la superficie de la esa zona.



Foto 2.5.1. Ripples de viento en una duna

Se han propuesto diferentes modelos para explicar la formación y geometría de los ripples. De entre los primeros de ellos, cabe señalar el de Bagnold (1941), que relacionó la geometría de los ripples con las trayectorias de saltación. Dicho modelo fue puesto en duda por primera vez por Sharp (1963), que argumentó que los granos de los ripples se mueven principalmente por reptación.

Anderson (1987) propuso un modelo consistente basado en datos experimentales y simulaciones numéricas de lechos de arena para explicar el desarrollo de los ripples. Según sus resultados, las arenas en saltación se componen de dos poblaciones: 1) partículas en saltación sucesiva, con trayectorias largas y con impactos de alta energía y 2) partículas en reptación, con sal-

tos de trayectorias cortas e impactos de baja energía. Los granos en saltación sucesiva muestran una distribución muy amplia de longitudes de salto con valores muy por encima de la longitud de onda de los ripples y con valores muy bajos de ángulos de impacto, de 1º a 2º. Esto sugiere que los granos en saltación con alta energía no contribuyen a la formación de ripples, sino que son el motor de los granos en reptación.

Utilizando un modelo simplificado de saltación eólica, Anderson pudo demostrar que un lecho de arena liso es inestable ante variaciones infinitesimales en el nivel del lecho, lo que da lugar a variaciones espaciales en el flujo de masa de granos en reptación. Convergencias y divergencias del flujo en reptación dan lugar a la formación de ripples, siendo los de crecimiento más rápido aquellos que tienen una longitud de onda comprendida entre 4 y 6 veces la distancia de reptación. A medida que aumenta la longitud de reptación con la tensión de corte del viento, también debe aumentar la longitud de onda del ripple.

Por lo tanto, la escala de la longitud de onda de los ripples está asociada a la longitud de reptación. El entramado de ripples se desarrolla a partir de la fusión de pequeños y grandes ripples con distintas velocidades de movimiento y por las fluctuaciones estadísticas en el flujo de masa de los granos reptantes. Finalmente, una longitud de onda cuasi-estable predomina debido a la rápida disminución en el número de fusiones entre ripples que tiene lugar a medida que crece el tamaño de los mismos.

3

Ecología



3.1 Introducción

El Capítulo 3 trata de las comunidades de organismos, particularmente vegetación, que se desarrollan sobre los depósitos arenosos costeros activos. El objetivo es describir los patrones y procesos de los ecosistemas dunares costeros en cuanto a especies y comunidades. Se mostrará cómo se produce la colonización de estos ambientes y cómo el ecosistema cambia en el espacio y en el tiempo.

3.2 El papel de la vegetación en la construcción de una duna costera

En el Capítulo 2 se ha descrito el proceso de construcción de la dunas costeras. Como se ha explicado las dunas comienzan a formarse en la zona de playa seca, siguiendo un proceso que incluye las siguientes fases: 1) Se produce la germinación de semillas o se desarrollan fragmentos de plantas, como rizomas o estolones. 2) Los granos de arenas son interceptados por la estructura aérea de la vegetación y comienzan a acumularse formando pequeños montículos



Foto 3.1. Coalescencia de montículos formados por vegetación pionera que darán lugar a una duna embrionaria.



Foto 3.2. Campo de nebkas que no dará lugar a la formación de un cordón dunar continuo.



Foto 3.3. En primer término, primer cordón dunar costero dominado por *Ammophila arenaria*, continuando hacia el mar con una duna embrionaria, con *A. arenaria* y *Elymus farctus*, y una banda de montículos efímeros formados por *Salsola kali* y *Cakile maritima*. Playa de Nueva Umbría, Lepe (Huelva).



Foto 3.4. Vegetación de playa seca formada por especies anuales como *Salsola kali* y *Cakile maritima*.

que crecen a medida que crece la planta. 3) Cuando la densidad vegetal es alta, los montículos se fusionan y forman una pequeña duna, denominada duna embrionaria. Si la densidad vegetal en la playa seca es baja, no se llegará a formar un cordón linear continuo, sino una zona de montículos aislados o nebkas.

Las especies de plantas capaces de formar dunas embrionarias continuas permanentes en las costas de la España peninsular y Baleares son principalmente las gramíneas *Ammophila arenaria* (barrón) y *Elymus farctus* (grama de mar), cuyo crecimiento se ve estimulado con el enterramiento de arenas. En Canarias, la ausencia de estas especies y las especiales condiciones ambientales sólo permiten la formación de campos de nebkas o montículos que se desarrollan principalmente sobre *Traganum moquinii* (balancón).

Otras muchas especies de plantas se desarrollan sobre la playa seca y forman depósitos de arena. Sin embargo, no evolucionan hacia dunas embrionarias estables. Los montículos pueden durar un sólo año si son de especies anuales como *Cakile maritima* y *Salsola kali*, o a lo sumo dos o tres años si el sector costero tiene una dinámica sedimentaria estable o regresiva. En este último caso, existe un número relativamente alto de especies perennes que pueden colonizar la playa seca, como *Polygonum maritimum*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias*, entre otras. Todas las especies de plantas que colonizan la playa seca en sectores costeros progradantes contribuyen, en mayor o menor medida, a la formación de dunas embrionarias estables junto con *A. arenaria* y *E. farctus*.

La colonización y supervivencia de las plantas de la playa seca, así como el desarrollo de depósitos de arena que puedan dar lugar a la formación de las dunas embrionarias, dependen de numerosos factores; **naturales**, como existencia de condiciones de viento favorables, aporte de arenas, presencia de especies de plantas adecuadas o adaptadas a las especiales condiciones ambientales de estos ambientes (Maun, 1998; Martínez y Moreno Casasola, 1996), y **antrópicos**, como las actividades relacionadas con la limpieza de playas y la circulación de personas a pie, a caballo o en vehículos motorizados.

3.3

Características ambientales del sistema playa-duna

Independientemente de la zona geográfica o climática donde se desarrollen los sistemas dunares, éstos presentan un conjunto de características ambientales derivadas de su conexión con el mar. Entre las características ambientales destacadas propias de las dunas costeras mencionamos el viento, la acumulación y erosión de arenas, la movilidad del substrato, la presencia de agua, spray y suelos salinos, inundaciones, estrés hídrico, substratos muy permeables de grano grueso con baja capacidad de campo y pobreza en nutrientes (Barbour *et al.*, 1985; Rozema *et al.*, 1985; Clark, 1986; Hesp, 1991; Kumler, 1997; Randall, & Scott, 1997). Estas características afectan a la composición y abundancia de la vegetación y a los caracteres de las plantas que la forman, pudiendo estos últimos estar relacionados con diferentes procesos en su ciclo vital: germinación, implantación, crecimiento, desarrollo, dispersión, senescencia, etc. (Moreno Casasola, 1986; Hesp, 1990, 1991; Maun, 1998; García Mora *et al.*, 1999).

No se puede establecer un rango general para las características ambientales mencionadas, ya que las dunas costeras son unos ambientes que presentan un patrón heterogéneo en el espacio y en el tiempo, relacionado con gradientes ambientales desde la zona intermareal

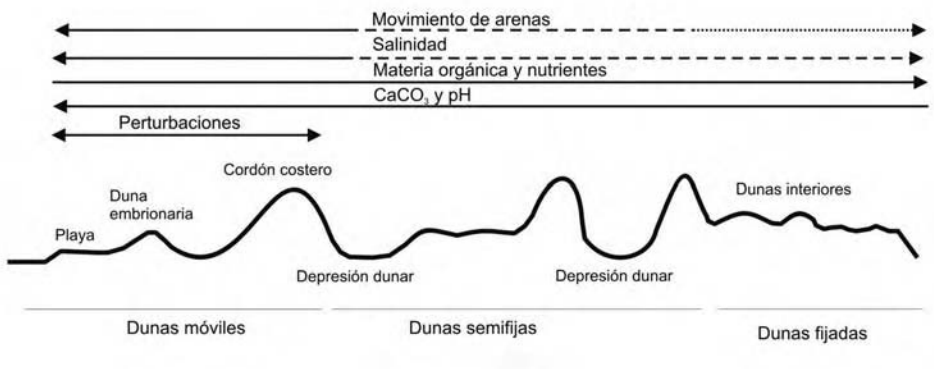


Figura 3.1. Gradientes abióticos en dunas costeras (modificado de Carter, 1988 y Brown & McLachlan, 1994).

hasta el interior y con perturbaciones recurrentes en las zonas de influencia marina directa (Hesp y Martínez, 2007). En general, la salinidad, movilidad y tamaño de las arenas, velocidad del viento, radiación y contenido en carbonato cálcico y pH del suelo decrecen hacia el interior, mientras que al contenido en materia orgánica y nutrientes se incrementa (Brown y McLachlan, 1994; Martínez y Psuty, 2004). Las perturbaciones, sin embargo, ocurren predominantemente entre la playa seca y el primer cordón dunar. Son eventos discretos o graduales, de intensidad variable, espacial y temporalmente, como son impactos del oleaje, inundaciones de agua de mar, erosión o sedimentación de arenas (Hesp y Martínez, 2007). En este último caso, se incluirían también las perturbaciones resultado del comportamiento animal y humano.

3.4 Adaptaciones de las especies de plantas

Como ya se expuso anteriormente, los organismos y concretamente, las especies de plantas que forman la vegetación de las dunas costeras, están sometidos a un amplio conjunto de condiciones ambientales poco favorables para su establecimiento y desarrollo. El resultado es que la vegetación suele presentar un número limitado de especies y suele estar dominada por unas pocas. Las especies presentes pueden hacer frente a las especiales condiciones restrictivas gracias al desarrollo de una serie de adaptaciones y de respuestas frente a dichas condiciones. Por ello, las especies de plantas de las dunas costeras en las zonas templadas del mundo presentan una gran similitud, morfológica y funcional, debido a las características físicas comunes de los ambientes costeros (Akeroid, 1997).

En la Tabla 3.1., elaborada a partir de Hesp (1991), se resumen algunos de estos factores ambientales estresantes y las adaptaciones de las plantas, con algunos ejemplos de especies que normalmente habitan las costas españolas. A continuación, también se muestran algunos ejemplos de cómo operan estas condiciones ambientales.

Tabla 3.1. Factores ambientales y adaptaciones de las plantas en el sistema playa – primer cordón dunar (Modificada de Hesp, 1991).

FACTOR AMBIENTAL	ADAPTACIÓN	EJEMPLOS
Spray salino	Resistencia / tolerancia / preferencia por la sal	*Cakile marítima* (resistente) *Salsola kali* (preferencia)
Enterramiento por arena	Estimulación del crecimiento Rizomas Estolones Bulbos	*Traganum moquinii; Ammophila arenaria;* *Elymus farctus;* *Ammophila arenaria; Elymus farctus* *Cyperus capitatus, Carex arenaria* *Pancratium maritimum*
Inundación por agua de mar	Resistencia a la inundación	*Cakile marítima* *Salsola kali* *Elymus farctus* (limitada) *Traganum moquinii* *Zygophyllum fontanesii*
Sequía	Pérdida de hojas Suculencia Adaptaciones de las raíces Eficiencia en el uso del agua	Algunas especies *Cakile marítima, Carpobrotus sp.* Varias especies La mayoría de las especies
Alta intensidad de luz, altas temperaturas	Curvamiento de las hojas Colores claros y pubescencia Adaptaciones osmóticas	*Ammophila arenaria* *Otanthus maritimus; Medicago marina* Muchas especies
Exposición al viento	Resistencia mecánica Formas aerodinámicas	Muchas especies Muchas especies: *Euphorbia peplis* (rastrera)
Salinidad del suelo	Resistencia a la sal Acumulación de sal Suculencia Adaptaciones osmóticas	*Salsola kali* *Salsola kali* *Cakile maritima; Carpobrotus sp.; Traganum moquinii;* *Zygophyllum fontanesii* Muchas especies
Pobreza en nutrientes	Fijación de nitrógeno Relaciones micorrízicas Retranslocación de nutrientes	Leguminosas Algunas especies: *Ammophila arenaria* *Carex sp.*
Erosión marina	Ciclo de vida anual Dispersión de semillas por agua Dispersión de semillas por el viento Rizomatosas Estoloníferas Bulbos	*Cakile marítima, Salsola kali, Linaria pedunculata* *Pancratium maritimum* *Muchas especies* *Ammophila arenaria; Elymus farctus* *Cyperus capitatus, Carex arenaria* *Pancratium maritimum*

Viento

Fuertes vientos cargados de arena son característicos de los sistemas dunares costeros. Su intensidad y carga de sólidos disminuye hacia zonas interiores a una tasa que depende del tipo de cubierta vegetal y de la topografía dunar. Su efecto sobre las plantas es bien directo, limitando el crecimiento y produciendo roturas, o bien indirecto, produciendo desecación y abrasión (Boyce, 1954). El efecto desecante se produce por un incremento de las tasas de evaporación. Sin embargo, el principal efecto del viento sobre las plantas es su capacidad de abrasión de los tejidos de las partes aéreas, cuyo daño es mayor si se une al efecto del spray salino (Yura y Ogura, 2006). Este efecto se produce sobre todo en alturas de unos 50 cm sobre el suelo (Boyce, 1954). Las adaptaciones frente a la abrasión del viento cargado de arena son morfológicas, de modo que las plantas adquirieron portes bajos o rastreros para evitar el impacto de la arena (por ejemplo, *Euphorbia peplis, Lotus creticus*), y anatómicas (Rozema *et al*., 1985; Yura y Ogura, 2006) con la formación de cutículas gruesas y esclerófilas (*Ammophila arenaria*, *Polygonum maritimum*) o pubescencia (*Otanthus maritimus*).

Spray salino

Es un aerosol con contenido en sales que, producido en el rompeolas de la playa, es desplazado por el viento hacia el interior. Se considera uno de los principales factores que influyen en distribución de la vegetación costera (Oosting y Billings, 1942; Davy y Figueroa, 1993). El spray salino daña la parte aérea de plantas herbáceas y leñosas, produciendo necrosis de las partes expuestas o de toda la planta. La intensidad de este factor disminuye hacia zonas interiores y está relacionado con las características de la zona rompeolas, la velocidad del viento, la altura de la vegetación y la topografía dunar (Brown y Maclachlan, 1994; Barbour, 1978; Short y Hesp, 1982). Si bien la cantidad de sales en suspensión es muy alta en la zona de playa, disminuye rápidamente hacia el interior, si bien puede ser apreciable hasta a unos 800m del mar (Lubke, 1983). La principal respuesta de las plantas frente a la acumulación de sales es la suculencia (tolerancia). Otras respuestas para evitar la acumulación de sales son la formación de gruesas cutículas, pubescencia y orientación de las hojas (resistencia) (Barbour, 1985; Davy y Figueroa, 1993; Rozema *et al*., 1985).

Salinidad del suelo

El spray salino y esporádicas inundaciones por agua de mar pueden contribuir al incremento del contenido en sales del suelo arenoso. Tras lluvias intensas, dicho contenido disminuye y puede llegar a ser menor del 1% (concentración en niveles de saturación de agua) (Barbour *e*t

al., 1985). Existen suelos con cantidades relativamente elevadas de sal en las zonas de playa seca y en la cara expuesta de las dunas embrionarias y estables. En zonas áridas, el contenido en sales del suelo es mayor que en zonas templadas y tropicales húmedas. Entre las adaptaciones de las plantas frente a elevados niveles de sales en el suelo encontramos, según cita Hesp (1991): i) desarrollo de resistencia a la sal, ii) estimulación de la germinación a bajas concentraciones de sal, iii) desarrollo de estructuras en el tejido externo que permiten la excreción de sal, iv) suculencia, y v) adaptaciones osmóticas.

Disponibilidad de agua

La capacidad de almacenamiento de humedad del suelo dunar es muy limitada debido a la alta permeabilidad que tienen los suelos arenosos, de textura gruesa, bajos contenidos en materia orgánica, y que además, están sujetos a altas radiaciones, temperaturas y al viento. Asimismo, durante los períodos secos y calurosos del verano, la escasa agua almacenada se agota rápidamente. Esta situación de falta o escasa disponibilidad de agua para las plantas es uno de los principales factores limitantes de los ecosistemas dunares costeros, existiendo, por tanto, muchas especies de plantas que han desarrollado adaptaciones frente al estrés hídrico (Hesp, 1991). Entre las adaptaciones a bajos niveles de disponibilidad de agua se pueden mencionar ajustes osmóticos (Rozema *et al.*, 1985), estructuras xeromórficas (Hesp, 1991), incluyendo suculencia, enrollamientos de hojas, pubescencia, secreción de ceras,...

Pobreza en nutrientes

La mayor parte de los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas están contenidos en el agua de mar (Rozema *et al.*, 1985), excepto nitrógeno, fósforo y potasio. Los nutrientes alcanzan la playa y duna vía spray marino (van der Valk, 1974), sumándose a los aportados por el viento, lluvia y niebla, pero se pierden de forma rápida mediante lixiviado hacia capas más profundas del suelo poco accesibles para las plantas (Hesp, 1991) y distribuidos de forma heterogénea (Cain *et al.*, 1999). Los nutrientes también pueden ser aportados al sistema por el oleaje y las mareas en forma de restos de algas y animales. Las adaptaciones de las plantas cuando existe una baja disponibilidad de nutrientes incluyen grandes desarrollos radicales laterales para la localización e intercepción de aquéllos (Pemadasa y Novell, 1974), retranslocación de nutrientes desde partes senescentes a zonas de crecimiento (Harte y Parmenter, 1983), asociaciones micorrízicas para la obtención de fósforo (Rodríguez-Echeverría y Freitas, 2006), con bacterias para la fijación de nitrógeno (Dalton *et al.*, 2004;), o con formas de crecimiento que impidan la instalación de otros individuos, entre otras.

Enterramiento por arenas

El enterramiento de las plantas a causa de la arena transportada por el viento en los sistemas dunares costeros se considera una de las restricciones más importantes para la implantación y desarrollo de la vegetación, ya que el enterramiento altera completamente el microambiente de las plantas, desde el estado de semilla hasta planta adulta, en superficie y bajo el suelo (Maun, 2004). La respuesta frente al enterramiento de las diferentes especies que habitan los sistemas dunares costeros puede ser de tres tipos (Maun, 1998):

- Respuesta inhibitoria negativa, en la cual la planta es incapaz de sobrevivir al enterramiento muriendo poco después del suceso.
- Respuesta neutral y después negativa, en la cual la planta muestra una escasa o nula respuesta inicial, ya que el enterramiento se produce a niveles tolerables. Sin embargo, a mayores niveles de enterramiento la respuesta se hace negativa y la planta muere.
- Respuesta de estimulación positiva, en la cual las especies muestran un incremento de desarrollo después de ciertos niveles de enterramiento. Esta es la respuesta de la mayor parte de las especies que viven en sistemas dunares activos.

No sólo es importante la cantidad de arena en cada episodio de enterramiento, sino también la velocidad a la que se produce. De las especies de la flora dunar española son *Elymus farctus* y *Ammophila arenaria* las que presentan una mayor adaptación al enterramiento, respondiendo con un estímulo positivo de crecimiento que a *A. arenaria* le permite resistir tasas de enterramiento de hasta 90 cm al año (Ranwell, 1958) y capacidad de germinar a semillas de *E. farctus* enterradas a unos 150 cm de profundidad. Las adaptaciones al enterramiento por arena incluyen mejoras en la asimilación de CO_2 (Yaun *et al*., 1993), crecimiento en superficie a expensas de reservas almacenadas en órganos subterráneos como bulbos, estolones o rizomas (Brown, 1997; Harrys y Davy, 1988), elevada productividad (Deshmukh, 1977), tolerancia (Martínez y Moreno Casasola, 1996),…



Foto 3.5. *Ammophila arenaria* y *Euphorbia paralias* en dunas con gran aporte de arena, Valdevaqueros, Tarifa (Cádiz).

Otro aspecto de gran importancia del enterramiento es la limitación del establecimiento de nuevas poblaciones de especies anuales, especialmente en zonas de playa seca y dunas embrionarias. El enterramiento a determinados niveles umbrales de profundidad puede resultar en la ausencia de germinación o incapacidad para emerger a través de la arena (Hesp, 1991). Como estrategia frente a estas situaciones, numerosas especies presentan bancos de semillas capaces de perdurar uno (bancos transientes) o más años (bancos permanentes), a la espera de situaciones en las que la erosión

disminuya la profundidad de enterramiento y les permita activar su germinación, o bien pueden recuperan las poblaciones perdidas por enterramientos episódicos mediante dispersión por agua de mar o viento desde poblaciones cercanas.

Erosión por el oleaje

El sistema playa seca-duna es un área dinámica en la que se produce un constante intercambio de sedimentos con el mar. En períodos de tormentas, los sedimentos acumulados en este sistema suelen ser masivamente erosionados y transportados hacia el mar. Según sea la dinámica predominante de la zona costera (Carter, 1990) y la magnitud de los temporales, los efectos sobre la vegetación de playa alta-duna varían, condicionando la composición y abundancia de especies y los caracteres morfológico funcionales de respuesta frente a este tipo de perturbación, que permitirán la supervivencia y recolonización de las zonas perturbadas (García Mora *et al.*, 1999, 2001; Maun, 2004, Hesp y Martínez, 2007). En sectores de costa progradantes, donde el sistema dunar aparece como una serie completa formado por comunidades de playa seca, dunas incipientes y primer cordón activo, los temporales suelen tener una escasa influencia afectando a las comunidades de playa seca y, ocasionalmente, a dunas embrionarias; sólo en ocasiones puede verse afectado el primer cordón dunar. El resultado suele ser la desaparición total o parcial de las plantas de la playa seca en algunas zonas debido al impacto mecánico del oleaje o a causa de la inundación por el agua del mar, no viéndose alterada prácticamente la composición de especies, si bien se tiende a seleccionar especies con resistencia o tolerancia a la salinidad.



Foto 3.6. Efectos de un temporal sobre la duna costera. Eliminación de vegetación y exposición de sistemas radicales de las plantas. En este caso bulbos, de *Pancratium maritimum*, que pueden ser dispersados por el mar a otras zonas de la costa.

En sectores de dinámica estable, donde se puede desarrollar la vegetación en la playa seca dos o más años seguidos, la incidencia de las tormentas suele resultar en niveles de inundación y de erosión moderados. Aquellas tormentas de gran intensidad pueden hacer desaparecer temporalmente la vegetación de playa seca que se formó durante períodos de tormentas de baja intensidad. En estos casos, el oleaje alcanza el primer cordón dunar socavándolo y eliminando la vegetación del pie de la duna y de la zona baja de la ladera expuesta. Finalmente, en sectores de costa en los que existe una dinámica erosiva, la escasa vegetación de playa desaparece con pequeños temporales, y en temporales de cierta magnitud, la erosión del primer cordón dunar es intensa, por lo que la vegetación existente es eliminada y se



Foto 3.7. Semillas de *Pancratium maritimum* germinando en la playa seca tras ser transportadas por el mar.

producen pendientes acusadas que pueden derivar en la formación de cubetas de deflación (blowouts) o roturas del primer cordón dunar con posibilidad de inundación de zonas interiores (washovers).

Frente a la erosión, las especies tienen mecanismos de recolonización de las zonas destruidas o alteradas mediante estrategias características de plantas pioneras (Maun, 2004; Hesp y Martínez, 2007), como es la capacidad de dispersión de propágulos (semillas o trozos de planta) a través del agua del mar, la dispersión de semillas arrastradas por el viento y su capacidad para extenderse rápidamente a partir de rizomas o estolones. Las especies que habitan en el sistema playa seca-duna tienen mecanismos de dispersión para que las semillas sean arrastradas por el viento (gran producción de semillas) y en alta proporción, por el agua (Andersen, 1993). La dispersión a través del viento permite que las semillas, sobre todo de especies anuales, lleguen a la zona dunar desde zonas interiores o desde otros sectores donde la erosión no ha afectado con tanta intensidad. La dispersión por agua de mar es posible para un conjunto muy limitado de especies cuyas semillas y/o trozos de plantas pueden flotar y no pierden la viabilidad (Ridley, 1930). Especies como *Cakile maritima*, *Calystegia soldanella*, *Pancratium maritimum*, *Ammophila arenaria*, *Honckenya peploides*, entre otras, tienen semillas, rizomas, estolones o bulbos que presentan este tipo de adaptación a la dispersión a través del agua de mar. Por otro lado, la capacidad que tienen numerosas especies costeras de producir rizomas, estolones o bulbos,…les permite recolonizar las zonas desnudas de forma rápida.

La dinámica sedimentaria del sector costero donde se localice la duna costera y la intensidad de las perturbaciones (magnitud y recurrencia) contribuyen en gran medida, junto con los factores arriba expuestos, a configurar la composición y abundancia de especies de las comunidades vegetales (Costa *et al.*, 1996; Hesp y Martínez, 2007).

3.5 Tipos funcionales de las plantas frente al estrés ambiental costero

Trabajos realizados recientemente acerca de la ecología de la vegetación de las dunas costeras (García Mora *et al.*, 1999; 2000) que han sido llevados a cabo en las costas del Golfo de Cádiz, pero extrapolables al resto de la Península, han establecido cómo se organiza la vegetación de los sistemas dunares activos. En función de la presencia o ausencia de adaptaciones a las diferentes restricciones que existen en este tipo de medios, las especies se pueden agrupar en tres grupos funcionales de plantas (ver Tabla 3.2.).

Los tres grupos pueden coexistir en un tramo concreto, si bien su proporción relativa varía según la dinámica sedimentaria de cada tramo costero (Carter, 1991). El tipo I incrementa su proporción relativa en los tramos más estables, el Tipo II aumenta en las dunas costeras afectadas por la erosión y el Tipo III se asocia a zonas donde dominan los procesos de acumulación eólica.

Tabla 3.2. Principales características y especies de los tipos funcionales de plantas de sistemas costeros activos del Golfo de Cádiz (modificado de García Mora *et al.*, 1999).

TIPO I	TIPO II	TIPO III
• Anual • Hojas mésicas • Biomasa subterránea axonomorfa de poco grosor o barbadilla • Altura biomasa aérea ≤ 15 cm	• Bianual o perenne • Hojas duras/ suculentas/pubescentes • Biomasa subterránea gruesa y ramificada	• Resistencia al enterramiento • Órganos de reserva subterráneos • Altura biomasa aérea > 15 cm • Dispersión marina
Aetheoriza bulbosa *Cynodon dactylon* *Rumex tingitanus* *Cutandia maritima* *Pseudorlaya pumilla* *Senecio vulgaris* *Anacyclus radiatus* *Bromus rigidus* *Bromus diandrus* *Carduus meonanthus* *Emex spinosa* *Erodium cicutarium* *Hedypnois cretica* *Hypochoeris glabra* *Lagurus ovatus* *Medicago littoralis* *Medicago minima* *Sonchus oleraceus* *Sonchus tenerrimus* *Scolymus maculatus* *Paronychia argentea* *Plantago coronopus* *Vulpia alopecurus*	*Artemisia crithmifolia* *Armeria pungens* *Crucianella maritima* *Helichrysum picardii* *Malcolmia littorea* *Linaria lamarckii* *Thymus carnosus* *Lotus creticus* *Pycnocomon rutifolium* *Reichardia gaditana* *Silene ramosissima* *Linaria pedunculata* *Ononis variegata*	*Cyperus capitatus* *Sporobolus pungens* *Calystegia soldanella* *Ammophila arenaria* *Elymus farctus* *Medicago marina* *Othantus maritimus* *Pancratium maritimum* *Eryngium maritimum* *Euphorbia paralias* *Polygonum maritimum* *Cakile maritima* *Salsola kali* *Euphorbia peplis*

La vegetación aparece formando comunidades laxas con patrones de diversidad muy heterogéneos, si bien siempre con una reducida riqueza de especies. Las zonas donde existe un mejor balance sedimentario son menos diversas y la vegetación, mantenida por la perturbación natural en estados iniciales de la sucesión, está dominada por especies de Tipo III (por ejemplo, *Ammophila arenaria* y *Elymus farctus*), que actúan como especies estructurantes. Además, las especies Tipo III representan un elemento clave para el mantenimiento del equilibrio dinámico de los sistemas dunares costeros y su abundancia relativa determina el grado de vulnerabilidad del mismo (García Mora *et al.*, 2001) y por tanto, constituyen un buen indicador biológico del estado de los sistemas dunares costeros.

3.6 Zonación de vegetación en los sistemas dunares costeros

Como resultado de la variación en el ambiente físico del sistema playa-dunas costeras, determinado por la distancia al mar, se pueden distinguir diferentes unidades fisiográficas y ecológicas funcionales en el espacio y en el tiempo. Las unidades ecológicas son hábitats discretos con una particular combinación ambiental de tipos edáficos, movilidad de substrato, hidrodinámica y microclima. Aquí se desarrolla una comunidad formada por especies de plantas y otros organismos que reúnen una serie de adaptaciones que les capacitan para desarrollarse en este tipo de ambientes cambiantes y restrictivos. El diferente gradiente de intensidad con el que actúan los factores de estos ambientes determina la existencia de un gradiente zonal desde la playa hacia el interior de los sistemas dunares costeros (Carter, 1990).

Las diferentes zonas de vegetación son fácilmente distinguibles perpendicularmente a la orilla del mar, existiendo una mayor diferenciación en costas progradantes. En aquellas no progradantes, la sectorización de la vegetación también es evidente debido al diferente grado de movilidad de la arena. Ésta se considera uno de los principales factores que modifica la distribución de las especies y la composición de las comunidades vegetales de los sistemas dunares costeros (Moreno Casasola, 1986; Dech y Maun, 2005). Existen diferentes esquemas de sectorización de las dunas costeras según el tipo de ecosistema o zonas de vegetación, siendo uno de los más sintéticos el propuesto por van der Maarel (1997), (ver Figura 3.2.).

En el caso del sector activo de influencia marina de los sistemas dunares costeros, si bien se han descrito hasta seis zonas distintas de vegetación del sistema playa-primer cordón (Doing, 1985), en este manual sólo vamos a considerar cuatro zonas fisiográficas principales de mayor

influencia marina y movilidad de substrato, con características ecológicas homogéneas internamente y comunes a la mayor parte de los sistemas dunares costeros de la Península Ibérica y Baleares. Estas cuatro zonas fisiográficas principales son A) Vegetación anual pionera, B) Vegetación de playa seca, C) Duna embrionaria, D) Cresta y ladera de barlomar del primer cordón dunar.



Figura 3.2. Sectorización transversal de un sistema dunar (modificado de van der Maarel, 1997).

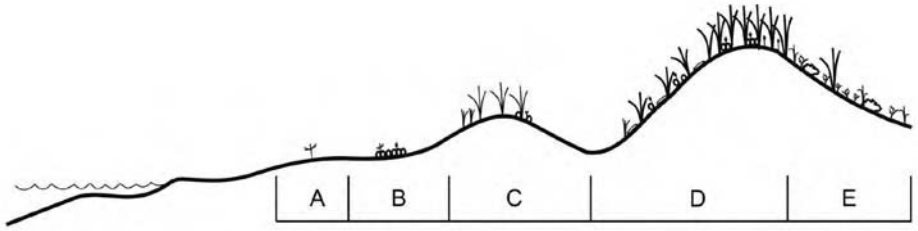


Figura 3.3. Zonación de la vegetación del sistema playa-primer cordón dunar en sectores de costa progradantes (Modificado de Doing, 1985).

3.7 Descripción de las comunidades de vegetación de las dunas costeras

3.7.1. Especies de plantas del sistema playa seca-primer cordón

El sistema playa-primer cordón dunar presenta comunidades vegetales formadas por un número relativamente bajo de especies. Las causas hay que buscarlas en las condiciones extremas de inestabilidad de estos ecosistemas, donde las perturbaciones ocasionadas por el oleaje y el enterramiento a causa de la arena imponen condiciones muy restrictivas para la supervivencia. García Mora (1999) mostró que en las costas del suroeste de España, cuando las condiciones ambientales son favorables para la formación de dunas (dinámica progradante), la diversidad de especies del primer cordón dunar es extremadamente baja. En esas condiciones, las comunidades suelen estar formadas por una o dos especies dominantes (*Ammophila arenaria* y *Elymus farctus*) y un bajo número de especies acompañantes. Si el aporte de arena al sistema dunar decrece, es decir, si decrece la movilidad de la arena, aumenta la diversidad de especies. Esto es debido a una disminución de la dominancia y sobre todo, a la presencia de un número mayor de especies. Otro factor que puede afectar a la diversidad del sistema dunar es la presión humana, que suele modificar las condiciones ambientales del sistema, permitiendo, en muchas ocasiones, aumentar el número de especies.

Actualmente, no existe ningún catálogo completo de las especies de plantas que habitan en el sistema playa-duna activa de las costas españolas. En la Tabla 3.3., se ha elaborado una relación de especies características del sistema playa seca-primer cordón dunar de seis regiones costeras españolas: País Vasco, Cantabria, Galicia, Andalucía, Alicante-Valencia y Cataluña. No obstante, no se han incluido especies propias de sistemas dunares interiores secundarios, semiestabilizados o estabilizados, ni las especies de plantas exóticas.

Este catálogo del sistema playa seca-primer cordón dunar está formado por 66 especies y subespecies. Si consideramos la representatividad de las zonas costeras seleccionadas, podemos decir que incluye a la mayoría de las especies presentes en este tipo de ecosistema en la España peninsular y Baleares. El número total de especies por zona costera es muy parecido, en torno a las 34 por zona. Si reducimos las 6 zonas a tres áreas geográficas, el número de especies también es muy similar: Cantábrico (País Vasco-Cantabria-Galicia) - 43 especies, Andalucía - 39 especies y Mediterráneo (Cataluña-Valencia-Alicante) - 38 especies. Del total

de especies, un 27,3% son comunes a las tres áreas y un 47% de las mismas están, al menos, en dos áreas geográficas. De las especies exclusivas, el área cantábrica presenta 15 especies, Andalucía, 9 y el área mediterránea, 7.

Tabla 3.3. Relación de especies de plantas de los sistemas dunares costeros activos de España.

	PAÍS VASCO	CANTABRIA	GALICIA	CATALUÑA ALICANTE	VALENCIA	ANDALUCÍA
Aetheorhiza bulbosa	+	+	+	+	+	+
Alyssum loiseleurii	+		+			
Ammophila arenaria subsp. arenaria	+	+	+			+
Ammophila arenaria subsp arundinacea			+	+	+	+
Anthemis maritima				+		
Armeria maritima	+	+	+			+
Armeria pungens			+			+
Artemisia caerulescens subsp. gallica				+		
Artemisia campestris maritima	+	+	+	+	+	+
Asperula occidentalis	+	+				
Aster squamatus				+		
Astragalus baionensis	+					
Cakile maritima subsp. integrifolia	+	+	+			
Cakile maritima subsp. maritima				+	+	+
Cakile maritima subsp. aegyptiaca			+			+
Calystegia soldanella	+	+	+	+	+	+
Carduus meonanthus						+
Carex arenaria	+	+	+			+
Centaurea aspera L. subsp. aspera				+		
Centaurea aspera subsp. stenophylla					+	
Centaurea polyacantha						+
Crucianella maritima	+	+	+	+	+	+
Cutandia maritima	+	+	+	+	+	+
Cyperus capitatus			+	+	+	+
Desmazeria marina	+	+	+	+		
Echinaria spinosa				+	+	
Echium gaditanum						+
Elymus farctus	+	+	+	+	+	+
Eryngium maritimum	+	+	+	+	+	+
Euphorbia paralias	+	+	+	+	+	+
Euphorbia peplis	+	+	+	+	+	+
Euphorbia portlandica	+	+	+			
Festuca rubra subsp. arenaria	+	+				
Glaucium flavum	+	+	+	+	+	+
Hedypnois arenaria					+	+
Herniaria ciliolata	+	+	+			
Honckenya peploides	+	+	+			

	PAÍS VASCO	CANTABRIA	GALICIA	CATALUÑA ALICANTE	VALENCIA	ANDALUCÍA
Hypochoeris glabra						+
Koeleria albescens	+	+				
Lagurus ovatus L.		+	+	+		
Launaea resedifolia				+	+	
Linaria maritima	+	+	+			
Linaria pedunculata						+
Lotus creticus				+	+	+
Malcolmia littorea			+		+	+
Maresia nana				+		
Matricaria maritima	+	+	+			
Matthiola sinuata			+	+		
Medicago littoralis	+	+	+	+	+	+
Medicago marina	+	+	+	+	+	+
Otanthus maritimus	+	+	+	+	+	+
Pancratium maritimum	+	+	+	+	+	+
Plantago maritima	+	+				
Polygonum maritimum	+	+	+	+	+	+
Pseudorlaya pumilla				+	+	+
Reichardia gaditana			+			+
Reichardia picroides				+	+	
Sagina nodosa	+	+				
Salsola kali	+	+	+	+	+	+
Silene littorea						+
Silene nicaeensis				+		+
Silene ramosissima					+	+
Silene uniflora	+	+	+			
Solidago macrorhiza	+					
Sporobolus pungens				+	+	+
Vulpia alopecurus						+
	35	33	36	34	29	39

Elaborado a partir de Asensi, A. & Diez, B. (1993); Crespo y Manso (1990); Gallego Fernández et al,. (2006); Izco (1993); Izco, Amigo & García-San León (2000); Loriente Escallada (1974); Rivas Martínez et al., (1980). La presencia de especies en las costas de Cataluña procede de inventarios recogidos en el Banco de Datos de Biodiversidad de Cataluña (BDBC-Departamento de Medio Ambiente).

3.7.2. Zonación de la vegetación del sistema playa seca-primer cordón dunar

A continuación, se analizará la zonación de la vegetación del sistema playa seca-primer cordón dunar tipificada de la siguiente manera: A) Vegetación anual pionera, B) Vegetación de playa seca, C) Duna embrionaria, D) Cresta y ladera de barlomar del primer cordón dunar.

- Vegetación anual pionera

Las especies vegetales asociadas a estos ambientes se caracterizan por tolerar grandes concentraciones salinas en el substrato, crecer en substratos ricos en nitrógeno y presentar modificaciones frente a las condiciones de aridez y salinidad. Las más características son *Cakile maritima*, *Salsola kali* y *Euphorbia peplis*, entre otras. La erosión mareal producida por los temporales de invierno representa el principal vector de dispersión de estas especies, distribuyendo los frutos, semillas y rizomas, junto con los restos orgánicos que actúan como almacén de nutrientes para la siguiente generación. La restauración de la comunidad vegetal tiene lugar fundamentalmente en primavera, desarrollándose rápidamente durante el verano gracias a la gran disponibilidad de nitrógeno, y produciendo semillas al principio del otoño.

- Vegetación de playa seca

En la zona más interior y persistente de la playa, la comunidad vegetal presenta un mayor número de especies, entre las que destacan *Honckenya peploides*, *Eryngium maritimum*, *Calystegia soldanella*, *Polygonum maritimum*, *Sporobolus pungens*, etc.

- Duna embrionaria

Cuando existen, las dunas embrionarias presentan una elevada acumulación de arenas que determina la presencia de un bajo número de especies muy adaptadas al enterramiento. Destaca la relativamente elevada presencia de *Elymus farctus* y *Ammophila arenaria*. Ambas especies facilitan la acumulación de arena y contribuyen activamente al crecimiento en anchura y altura de la duna embrionaria. Otras especies características, que aparecen, generalmente, en bajas coberturas (según la tasa de acumulación de arenas) son *Polygonun maritimum*, *Euphorbia paralias*, *Otanthus maritimus* y *Eryngium maritimum*.

- Primer cordón

En el cordón dunar costero, *Ammophila arenaria* es la especie psammofila más cosmopolita, que junto con *Elymus farctus*, constituye el principal precursor del crecimiento del depósito sedimentario eólico. Otras especies características son *Otanthus maritimus, Medicago marina, Euphorbia paralias, Cyperus capitatus, Eryngium maritimum, Echinophora spinosa, Pancratium maritimum*, etc.

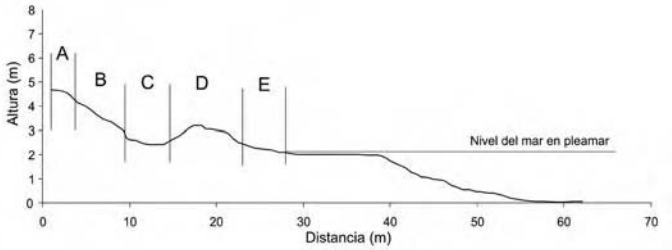
La presencia de esta serie completa de vegetación sólo se produce en dunas de sectores costeros progradantes, con un elevado aporte de arena traído por el oleaje, que es transportado hacia el interior por el viento (ver Cuadro 3.1).

Cuando la dinámica sedimentaria es menos intensa, no se forma duna embrionaria, siendo la frecuencia e intensidad de los temporales lo que determina la presencia de comunidades de playa seca y pioneras (ver Cuadro 3.2).

Finalmente, en costas erosivas, la existencia de comunidades en la zona de playa es muy efímera, estando formadas por especies de plantas pioneras que se desarrollan en primavera y verano, para desaparecer en los meses de otoño e invierno. El cordón dunar, en este último caso, suele presentar la ladera expuesta al mar muy escarpada, debido a la erosión del oleaje. A su vez, la vegetación acostumbra a estar instalada en la parte alta de la ladera y en la cresta, presentando frecuentemente numerosas raíces expuestas y un estado fisiológico deficiente (Ver Cuadro 3.3).

Cuadro 3.1. Vegetación de dunas costeras progradantes. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005).

Las sectores de costa progradantes suelen tener la serie completa del sistema playa alta-primer cordón dunar. Se caracterizan por presentar un elevado aporte de arenas procedentes de la playa seca. La vegetación de playa alta es efímera restringida a los meses de primavera y verano. La duna embrionaria presenta una vegetación pobre y de bajas coberturas, dominada por *A. arenaria* y *E. farctus*. El primer cordón dunar es más diverso que las dunas embrionarias pero más pobre que las dunas estables, está dominado por *A. arenaria*.

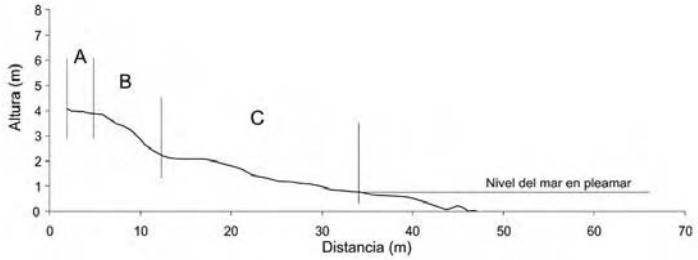


A: Cresta primer cordon	B: Ladera primer cordón	C: Depresión	D:Duna embrionaria	C: Playa alta
Ammophila arenaria	*Ammophila arenaria*	*Ammophila arenaria*	*Ammophila arenaria*	*Elymus farctus*
Elymus farctus	*Elymus farctus*	*Otanthus maritimus*	*Elymus farctus*	*Salsola kali*
Eryngium maritimum	*Otanthus maritimus*	*Eryngium maritimum*	*Otanthus maritimus*	*Cakile maritima*
Hedypnois arenaria	*Eryngium maritimum*	*Euphorbia peplis*	*Cakile maritima*	
Pseudorlaya pumila	*Pancratium maritimum*		*Eryngium maritimum*	
Reichardia gaditana				
Pancratium maritimum				



Cuadro 3.2. Vegetación de dunas costeras estables. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005).

En tramos costeros donde el aporte de arena es bajo, el primer cordón dunar se encuentra estabilizado. Presenta un número relativamente alto de especies, coexistiendo las características de zonas altamente perturbadas por enterramiento e influencia marina con especies de zonas más interiores. Se puede formar duna embrionaria pero desaparece en pocos años debido a temporales. Sólo la vegetación de playa alta aparece de forma regular, si bien suele ser eliminada todos los años o cada dos años, a lo sumo. Según su persistencia, la vegetación de playa alta tiene mayor o menor número de especies, aunque normalmente está dominada por especies anuales.

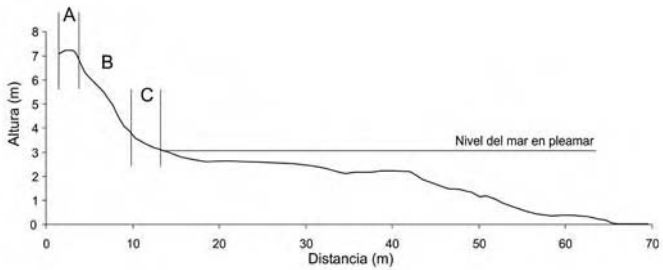


A: Cresta primer cordon	B: Ladera primer cordón	C: Playa alta
Ammophila arenaria	*Ammophila arenaria*	*Ammophila arenaria*
Elymus farctus	*Elymus farctus*	*Elymus farctus*
Malcolmia littorea	*Malcolmia littorea*	*Malcolmia littorea*
Silene nicaeensis	*Silene nicaeensis*	*Silene nicaeensis*
Crucianella maritima	*Crucianella maritima*	*Eryngium maritimum*
	Artemisia crithmifolia	*Cakile maritima*
	Pancratium maritimum	*Euphorbia paralias*
	Eryngium maritimum	*Otanthus maritimus*
		Polygonum maritimum
		Salsola kali



Cuadro 3.3. Vegetación de dunas costeras erosivas. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005).

La zonación de la vegetación de dunas de sectores costeros erosivos se restringe al primer cordón, no existiendo normalmente vegetación de playa alta. Tras períodos de temporales que socavan la base del primer cordón, se reconstruye un perfil de equilibrio mediante derrumbes de las zonas medias y altas del cordón. La vegetación recoloniza la base de la duna a partir de propágulos dispersados por el mar, el viento, y a partir de la vegetación existente en el propio cordón, mediante el crecimiento de rizomas y estolones.



A: Cresta primer cordon	B: Ladera primer cordón	C: Base (derrumbe)
Ammophila arenaria	*Ammophila arenaria*	*Elymus farctus*
Crucianella maritima	*Crucianella maritima*	
Cutandia maritima	*Cutandia maritima*	
Malcolmia littorea	*Medicago littoralis*	
	Pancratium maritimum	
	Hedypnois arenaria	
	Elymus farctus	



3.7.3. Zonación fitosociológica en dunas costeras de España

La mayor parte de los trabajos descriptivos de la vegetación del sistema playa seca- primer cordón dunar en España han sido realizados por botánicos. Se ha elaborado una gran cantidad de inventarios de plantas de las diferentes zonas de vegetación mediante técnicas de muestreo fitosociológicas, las cuales han conducido a la existencia de una importante documentación sobre numerosos sistemas dunares de la Península y Baleares.

Los ecólogos también han abordado el estudio de las dunas españolas profundizando en la relación entre las características del medio y la composición y abundancia de especies. Sin embargo, los estudios ecológicos son muy escasos y han estado centrados en zonas interiores de los sistemas dunares, principalmente del Golfo de Cádiz, siendo las dunas móviles de Doñana las que acaparan un mayor esfuerzo de investigación (García Novo 1975, 1979, 1990; García Novo y Merino, 1997; García Novo *et al.*, 2004; entre otras). Aspectos ecológicos del sistema de playa seca-primer cordón han sido abordados por García Mora *et al.* (1999, 2000, 2001), también en el Golfo de Cádiz.

La importante información descriptiva de la vegetación que se ha obtenido mediante las técnicas geobotánicas ha hecho que el sistema de clasificación fitosociológica sea comúnmente utilizado por las administraciones del estado y autonómicas para dotar de contenido los sistemas de información geográfica como herramientas para el planeamiento del territorio y su conservación. La utilización de este sistema de clasificación ha sido también adoptado por la Unión Europea (Directiva Hábitat) para el diseño y construcción de la Red Natura 2000 (ver Apartado 3.8.2), mediante la designación de asociaciones o comunidades de plantas cuyos hábitats hay que proteger en las futuras Zonas de Especial Conservación (denominación de las futuras áreas protegidas).

En el Cuadro 3.4. se muestran las asociaciones fitosociológicas (diferentes tipos de comunidades de plantas) descritas en los sistemas playa seca-primer cordón dunar de las costas españolas (Rivas Martínez *et al.*, 2001).

Cuadro 3.4. Comunidades fitosociológicas descritas en el sistema playa seca-primer cordón dunar de las dunas costeras españolas (a partir de Rivas Martínez et al., 2001).

- Cakiletea maritimae Tüxen & Preising ex Br.-Bl. & Tüxen 1952

ASOCIACIÓN	ESPECIES CARACTERÍSTICAS	HÁBITAT	DISTRIBUCIÓN
Salsolo kali-Cakiletum maritimae	*Cakile maritima Subsp. maritima* *Salsola kali Subsp. kali* *Polygonum maritimum*	Playa seca	Mediterráneo
Polygono maritimi-Elymetum pycnanthi	*Elymus pycnanthus* *Polygonum maritimum* *Beta marina* *Raphanus raphanistrum ssp. Landra* *Atriplex prostrata*	Playa seca	Galicia País Vasco
Atriplici hastatae-Betetum maritimae	*Beta maritima* *Atriplex postrata* *A. patula* *Cakile maritima Subsp. integrifolia*	Duna-saladar	Galicia
Honckenyo-Euphorbietum peplis	*Honckenya peploides* *Salsola kali* *Cakile marítima*	Playa seca	Cantábrico Galicia Portugal

- Ammophiletea Br.-Bl. & Tüxen ex Westhoff, Dijk & Passchier 1946

COMUNIDAD VEGETAL	ESPECIES CARACTERÍSTICAS	HÁBITAT	DISTRIBUCIÓN
Euphorbio paraliae-Agropyretum junceiformis	*Elymus farctus* *Othantus maritimus* *Eryngium maritimum* *Euphorbia paralias*	Playa seca progradante Duna embrionaria	Cantábrico Galicia Portugal Golfo Cádiz
Otantho maritimi-Ammophiletum australis	*Euphorbia paralias* *Othantus maritimus* *Ammophila arenaria* *Calystegia soldanella*	Primer cordón	Cantábrico Galicia Portugal Golfo Cádiz
Loto cretici-Ammophiletum australis	*Ammophila arenaria* *Lotus creticus*	Dunas semifijas	Portugal Andalucía Mediterráneo
Medicagini marinae-Ammophiletum australis	*Ammophila arenaria subsp. Arundinacea* *Medicago marina* *Eryngium maritimum*	Crestas dunas secundarias	Mediterráneo (Atlántico)
Cypero mucronati-Agropyretum juncei	*Elymus farctus* *Othantus maritimus* *Echinophora spinosa*	Montículos muy móviles	Mediterráneo

- Ammophiletea Br.-Bl. & Tüxen ex Westhoff, Dijk & Passchier 1946			
COMUNIDAD VEGETAL	ESPECIES CARACTERÍSTICAS	HÁBITAT	DISTRIBUCIÓN
Eryngio maritimi-Sporoboletum arenarii	*Sporobolus arenarius* *Eryngium maritimum* *Salsola kali*	Montículos móviles salobres	Portugal Andalucía Mediterráneo
Iberidetum procumbentis	*Iberis procumbens* *Linaria caesia var. decumbens*	Sotamar primer cordón	Galicia Portugal
Traganetum moquinii	*Traganum moquinii* *Salsola vermiculata* *Suaeda vera* *Atriplex glauca*	Primera banda dunar (50-100 m)	Canarias
Atripli-Chenoleoidetum tomentosae	*Chenoleoides tomentosa* *Atriplex glauca Polycarpaea nivea*		Canarias
Zigophyllo fontanesii-Polycarpaetea niveae	*Zygophyllum fontanesii* *Polycarpaea nivea*		Canarias
Polycarpaeo-Lotetum lancerottensis	*Lotus lancerottensis* *Polycarpaea nivea* *Zygophyllum fontanesii* *Chenoleoides tomentosa*		Canarias
Salsolo kali-Cakiletum maritimae	*Cakile maritima Zygophyllum fontanesii*		Canarias
Euphorbio paraliasi-Cyperetum capitati	*Euphorbia paralias* *Cyperus capitatus* *Polygonum maritimum* *Ononis serrata*		Canarias

3.8 Conservación y protección de especies y comunidades

3.8.1. Especies de plantas protegidas a nivel estatal y autonómico

En este apartado se recogen las especies de plantas dunares que se encuentran protegidas en la España peninsular, Canarias y Baleares. Todas las especies protegidas están incluidas en Catálogos de especies amenazadas realizados tanto a nivel estatal como autonómico (ver Tabla 3.4). En el marco estatal, la principal herramienta legal para la protección, tanto de los ecosis-

temas como de las especies de fauna y flora, es la *Ley de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre*, de 1989. En el marco autonómico, el desarrollo de la legislación es muy heterogéneo. De las diez comunidades autónomas donde hay dunas costeras, sólo en ocho se han aprobado catálogos de especies amenazadas de la flora, al amparo de la legislación autonómica mediante Decretos u Órdenes. En Cataluña existe un proyecto de decreto desde 2006, aún no aprobado; y en Cantabria no existe ningún catálogo completo de especies de flora amenazada. Las figuras de protección utilizadas en las diferentes normativas son diversas, si bien, en general, siguen la establecida en la Ley 4/89 (ver Tabla 3.5.).

Tabla 3.4. Catálogo nacional y catálogos autonómicos de especies de flora amenazada.

Estado Español	MMA 2006. Catálogo Nacional de Especies Amenazadas (1990-2006). Dirección General para la Biodiversidad. Madrid.
Andalucía	Ley de la C.A. de Andalucía 8/2003, de 28 de octubre, de la Flora y la Fauna Silvestres.
Asturias	Decreto 65/95, de 27 de abril, por el que se crea el Catálogo Regional de Especies Amenazadas de la Flora del Principado de Asturias y se dictan normas para su protección.
Baleares	Decreto 75/2005, de 8 de julio, por el cual se crea el Catálogo Balear de Especies amenazadas y de Especial Protección, las Áreas Biológicas Críticas y el Consejo Asesor de Fauna y Flora de les Illes Balears.
Canarias	Decreto 151/2001, de 23 de julio, por el que se crea el Catálogo de Especies Amenazadas de Canarias.
Cantabria	-
Cataluña	Projecte de Decret /2006, de creació del Catàleg de Flora amenaçada autòctona de Catalunya.
Galicia	Decreto 88/2007, de 19 de abril, por el que se regula el Catálogo gallego de especies amenazadas.
Murcia	Decreto nº 50/2003, de 30 de mayo, por el que se crea el Catálogo Regional de Flora Silvestre Protegida de la Región de Murcia y se dictan normas para el aprovechamiento de diversas especies forestales.
País Vasco	Orden de 10 de julio de 1998, del Consejero de Industria, Agricultura y Pesca por la que se incluyen en el Catálogo Vasco de Especies Amenazadas de la Fauna y Flora, Silvestre y Marina, 130 taxones y 6 poblaciones de la flora vascular del País Vasco.
Valencia	Orden de 20 de diciembre de 1985, de la Conselleria de Agricultura y Pesca, sobre protección de especies endémicas o amenazadas.

Tabla 3.5. Figuras de protección de la Ley 4/89 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres.

- **En peligro de extinción.** Aquellos cuya supervivencia es poco probable si los factores de amenaza actual siguen operando. Exige la redacción de un Plan de Recuperación.
- **Sensibles a la alteración de su hábitat.** Aquéllos cuyo hábitat característico está particularmente amenazado, en grave regresión, fraccionado o muy limitado. Exige la redacción de un Plan de Conservación del Hábitat.
- **Vulnerables.** Aquéllos que corren el riesgo de pasar a las categorías anteriores en un futuro inmediato si los factores de amenaza actuales no son corregidos. Exige la redacción de un Plan de Conservación.
- **De interés especial.** Aquéllos que, sin estar en las categorías anteriores, sean merecedores de una atención particular en función de su valor científico, ecológico, cultural o por su singularidad. Exige la redacción de un Plan de Manejo.

En el listado de especies de plantas (ver Tabla 3.6.), sólo se han incluido aquellas protegidas pertenecientes a dunas activas (playa seca, dunas embrionarias y primer cordón dunar) y algunas especies que suelen aparecer en zonas dunares rejuvenecidas por retroceso del primer cordón dunar costero.

En la Tabla 3.6., se puede observar que existen veintiocho especies de plantas de dunas con algún tipo de protección legal en España. A nivel estatal, sólo están protegidas dos especies (el número total de especies y subespecies de flora protegida a nivel estatal es de 139), el resto están incluidas en los diferentes catálogos de especies amenazadas de las diez comunidades autónomas. El mayor número de especies protegidas se encuentra en Asturias (con ocho especies) y en el País Vasco (con siete especies). Destacan las comunidades de Valencia, Murcia y Galicia, con dos o menos especies de dunas protegidas.

En definitiva, la protección que ofrece la legislación estatal y autonómica no ampara a la mayor parte de las especies que pueden presentar problemas para su conservación. Por tanto, es necesario consultar otros documentos de referencia que puedan indicar de forma más o menos precisa el grado de amenaza que presenta un buen número de especies de la flora dunar. Entre los documentos de referencia destacamos el *Libro Rojo de Especies Vegetales Amenazadas de España Peninsular e Islas Baleares* (Gómez Campo, 1987), la *Lista Roja de la Flora Vascular Española* (VV.AA., 2000) o el *Atlas y Libro Rojo de la flora vascular amenazada de España. Taxones prioritarios* (Bañares *et al.*, 2004). Además, existen libros rojos publicados en diferentes comunidades autónomas. El documento L*ista Roja de la Flora Vascular Española c*onstituye el principal referente actual sobre la flora amenazada, ya que en él se recogen 1.414 taxones de la flora española peninsular e insular (Devesa, 2006).

Tabla 3.6. Especies de flora dunar protegida por la legislación estatal y autonómica.

	Nacional	Canarias	Cataluña	Valencia	Murcia	Baleares	Andalucía	Galicia	Asturias	Cantabria	País Vasco
Androcymbium psammophilum		2									
Crucianella maritima									2		
Euphorbia peplis									2		
Festuca rubra L. subsp. arenaria											3
Festuca vasconcensis											3
Herniaria ciliolata subsp. robusta											4
Honckenya peploides											3
Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa				Anex 1			1				
Juniperus phoenicea subsp. turbinata			3		4						
Kickxia sagittata var. urbanii		4									
Koeleria albescens											3
Linaria arenaria								1			
Linaria lamarckii							3				
Linaria pedunculata			3								
Linaria supina subsp. marítima									1		
Linaria tursica	3						1				
Malcomia littorea									1		
Medicago marina									2		3
Ononis natrix L. subsp. ramosissima											3
Otanthus maritimus					4	2			3		
Pancratium maritimum						2			4		
Reichardia gaditana									2		
Silene ramosissima			3								
Thymus carnosus							1				
Traganum moquinii		3					1				
Vulpia fontquerana	3										
Zygophyllum album			1								
Zygophyllum gaetulum		3									

(Categorías de protección: 1:Peligro de Extinción; 2:Sensible a la alteración de su hábitat; 3:Vulnerable; 4: De interés especial).

3.8.2. Comunidades de vegetación de la Red Natura 2000

La Unión Europea crea la Red Natura 2000, configurada como una red ecológica de espacios europeos denominados Zonas Especiales de Conservación (ZEC). La creación de dicha red viene establecida en la Directiva 92/43/CEE del Consejo de Europa, conocida como Directiva Hábitat. El objetivo principal de esta Directiva es contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres calificados de interés comunitario en el territorio europeo de los Estados miembros, mediante el mantenimiento o restablecimiento de los mismos en un estado de conservación favorable. La Directiva 92/43/CEE se traspuso al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 1997/1995.

La Directiva Hábitat establece una relación de hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres que deben ser conservados. Asimismo, incluye en su Anexo I diecisiete tipos de hábitats dunares costeros de toda la Unión Europea, de los cuales seis son prioritarios, es decir, amenazados. En España se localizan diez de estos hábitats incluidos en el Anexo I de la Directiva, pertenecientes a las dunas marítimas de las costas atlánticas y mediterráneas (ver Cuadro 3.5). En el Cuadro 3.6, se describen brevemente los tipos de hábitats correspondientes a dunas activas y dunas activas que fueron fijadas con plantaciones de pinos (MMA, 2005; European Comision, 2003).

Por tanto, las "especies de interés comunitario" cuyo hábitat se debe proteger son aquellas que se consideran en peligro, sean vulnerables, raras o endémicas y que requieran especial atención debido a la singularidad de su hábitat y/o a posibles repercusiones que su explotación pueda tener para su conservación. Estas especies figuran o podrán figurar en el Anexo II y/o IV o V de la citada Directiva. Se consideran "especies prioritarias" aquéllas cuya conservación supone una especial responsabilidad para la Comunidad. Estas especies prioritarias se señalan con un asterisco (*) en el Anexo II.

Cuadro 3.5. Hábitats naturales de dunas costeras recogidos en la Directiva 92/43/CEE existentes en España (*hábitats naturales prioritarios).

DUNAS MARÍTIMAS

21 Dunas marítimas de las costas atlánticas, del mar del Norte y del Báltico

2110 Dunas móviles embrionarias
2120 Dunas móviles de litoral con *Ammophila arenaria* (dunas blancas)
2130 Dunas costeras fijas con vegetación herbácea (dunas grises) (*)
2150 Dunas fijas descalcificadas atlánticas (Calluno-Ulicetea) (*)
2190 Depresiones interdunares húmedas

22 Dunas marítimas de las costas mediterráneas

2210 Dunas fijas de litoral del *Crucianellion maritimae*
2230 Dunas con céspedes del Malcomietalia
2250 Dunas litorales con Juniperus spp. (*)
2260 Dunas con vegetación esclerófila de Cisto-Lavanduletalia
2270 Dunas con bosques de *Pinus pinea* y/o *Pinus pinaste*r (*)

Cuadro 3.6. Breve descripción de los tipos de hábitats correspondientes a dunas activas y dunas activas que fueron fijadas con plantaciones de pinos.

21 Dunas marítimas de las costas atlánticas

2110 Dunas móviles embrionarias

Formaciones vegetales herbáceas perennes que representan el primer estadio de construcción dunar. Se forman en elevaciones de superficies de arena en la playa seca o en la banda delantera del primer cordón dunar. Se localizan en las costas de todas las comunidades autónomas costeras (en Canarias, sólo en Lanzarote y Fuerteventura).

La especie más común es la gramínea *Elymus farctus* (subespecie, *E. farctus subsp. farctus*, en costas mediterráneas, y *E. farctus subsp. boreo-atlanticus* en costas atlánticas). Son comunidades pobres en especies, entre las que pueden aparecer *Honckenya peploides, Euphorbia paralias, Eryngium maritimum, Pancratium maritimum, Euphorbia peplis, Otanthus maritimus, Medicago marina* o *Calystegia soldanella*. En Canarias, domina *Cyperus capitatus* con *Euphorbia paralias, Polygonun maritimum, Polycarpaea nivea*, etc.

2120 Dunas móviles de litoral con Ammophila arenaria (dunas blancas)

Formaciones vegetales de herbáceas perennes de dunas móviles que forman el primer cordón o cordones de un sistema dunar costero. Se localizan en las costas de todas las comunidades autónomas costeras.

Se corresponde con comunidades de plantas dominadas por *Ammophila arenaria*, a la que acompañan especies psammofilas como *Eryngium maritimum, Euphorbia paralias, Calystegia soldanella, Otanthus maritimus, Leymus arenarius, Echinophora spinosa, Euphorbia paralias, Medicago marina, Anthemis maritima*. En Canarias no aparece *Ammophila arenaria* y la comunidad está formada por especies como *Zygophyllum fontanesii, Euphorbia paralias, Polycarpaea nivea, Cyperus capitatus, Ononis natrix, *Convolvulus caput-medusae, Polygonum maritimum, *Androcymbium psammophilum.*

2130 Dunas costeras fijas con vegetación herbácea (dunas grises) (*)
Dunas fijas, estabilizadas y colonizadas por un pastizal más o menos cerrado y pequeños arbustos aislados. Puede presentar abundante cubierta de líquenes y musgos. Hábitat presente en las costas arenosas atlánticas y Canarias (Lanzarote y Fuerteventura).

En las costas cantábricas, este tipo de hábitat es poco frecuente, con *Crucianella maritima, Helichrysum stoechas, Koeleria glauca, Sporobolus arenarius, Carex arenaria*, etc. Entre Galicia y Cádiz, la comunidad está dominada por *Armeria pungens* y *A. welwitschii*, acompañadas por *Crucianella maritima* y otras como *Iberis procumbens, Thymus carnosus, Echium gaditanum, Jasione lusitanica, Helichrysum italicum subsp. serotinum, Artemisia crithmifolia*, etc. En Canarias, estas dunas están presididas por *Traganum moquinii* o *Zygophyllum fontanesii*, acompañadas por otras especies como *Lottus lancerottensis, Androcymbium psammophilum y Convolvulus caput-medusae*.

22 Dunas marítimas de las costas mediterráneas

2210 Dunas fijas de litoral del Crucianellion maritimae
Dunas terciarias o grises de las costas mediterráneas con escasa movilidad de substrato, cubiertas por una vegetación de porte bajo. Este tipo de hábitat se localiza en todas las comunidades autónomas de la costa mediterránea.

Las especies características de esta formación vegetal son *Crucianella marítima y Pancratium maritimum*. Con ella, pueden crecer otros pequeños arbustos o matas, como *Ononis natrix subsp. ramosissima, Helichrysum italicum, Teucrium dunense* (sureste ibérico), Scrophularia ramosissima (Baleares), *Ambrosia maritima*, etc., además de otras especies características de arenales costeros como *Lotus creticus, Eryngium maritimum, Calystegia soldanella*, etc.

2230 Dunas con céspedes del Malcomietalia

Comunidades vegetales anuales de desarrollo primaveral efímero, que colonizan los claros existentes entre la vegetación leñosa de las dunas. Este tipo de hábitat se encuentra en todas las comunidades autónomas mediterráneas, suroeste de Andalucía y Galicia.

Entre las especies que forman estas comunidades destacan las de los géneros Linaria, con especies como *L. pedunculata, L. munbyana, L. tursica; Silene, con S. littorea, S. gaditana, S. gracilis, S. cambessedesii*, etc.; y Ononis, con *O. cossoniana, Ononis baetica, Ononis broteriana*, etc. Otras especies de interés son *Loeflingia baetica, Maresia nana, Hedypnois arenaria, Malcolmia ramosissima, M. littorea, Anthyllis hamosa, Lophochloa salzmannii, Trisetaria dufourei, Vulpia fontquerana*, etc.

2250 Dunas litorales con Juniperus spp. (*)
Dunas estabilizadas del interior del sistema dunar, cubiertas con vegetación madura de porte arbustivo alto dominada por variantes costeras de enebro y sabina (*Juniperus*). Este tipo de hábitat se distribuye por todas las comunidades autónomas de la costa mediterránea y el Golfo de Cádiz.

Las especies características de estas comunidades son *Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa*, cuyas formaciones, en las que es dominante, reciben el nombre de enebrales, y *J. phoenicea subsp. turbinata*, que forma los sabinares. En las costas atlánticas (incluida Galicia), este hábitat está asociado con la presencia de especies de matorral dunar como *Corema album y Halimium halimifolium*.

2270 Dunas con bosques de Pinus pinea y/o Pinus pinaster (*)
Dunas estabilizadas del interior del sistema dunar, cubiertas con pinos, como *Pinus pinea, P. pinaster o P. halepensis*, derivados de repoblaciones realizadas entre los siglos XIX y mediados del XX. Estas formaciones se encuentran en el Golfo de Cádiz, Comunidad Valenciana y Cataluña.

3.9

Especies exóticas

El término "especie exótica" se refiere a las especies que no son propias de la flora de una región o zona determinada y que han sido introducidas por acción del hombre. La palabra exótica cuenta con una serie de sinónimos como por ejemplo, alóctona, xenófita, neófita, foránea o no nativa, entre otros. Las introducciones de estas especies pueden producirse bien por acción humana directa, realizadas de forma consciente y con fines determinados, o bien indirecta, es decir, de forma involuntaria pero siempre mediadas por agentes humanos.

Las introducciones de especies exóticas se han producido a lo largo de toda la Historia del hombre, pero es desde principios del siglo XX y sobre todo, en las últimas décadas, cuando las introducciones se han incrementado de forma exponencial. La presencia de especies exóticas en ecosistemas humanizados, naturales y seminaturales forma parte de un fenómeno global de homogeneización de la biosfera.

Además, las especies exóticas, al naturalizarse, pueden alterar las características estructurales y funcionales de los ecosistemas naturales y seminaturales, en ese caso se denominan especies invasoras. Su establecimiento y expansión suele poner en peligro a determinadas especies y procesos de los ecosistemas, pudiendo a su vez causar numerosos incovenientes relacionados con la economía y salud humana.



Foto 3.8. *Carpobrotus edulis*, especie exótica invasora sudafricana.



Foto 3.9. *Oenothera drumondii*, especie exótica invasora norteamericana.



Foto 3.10. Ajardinamiento con especies exóticas en Tres Piedras. Chipiona (Cádiz).

Sin embargo, no todas las especies exóticas pueden convertirse en invasoras (5-20%), ni todos los hábitats o ecosistemas son igualmente susceptibles de ser invadidos. El carácter invasor de una especie vendrá dado, principalmente, por la posibilidad de dispersión de propágulos, capacidad competitiva y predación limitada. La invasibilidad de los ecosistemas está relacionada directamente con el tipo, frecuencia e intensidad de las perturbaciones y con características estructurales (diversidad) de las comunidades nativas (Davis *et al.*, 2000; Orians, 1980; Mack and D'Antonio, 1998).

Las zonas litorales son las que soportan un mayor número de especies exóticas estando, por tanto, más expuestas a futuras invasiones. Los ecosistemas dunares costeros son altamente dinámicos, sobre todo hábitats de playa seca y duna activa, con una elevada superficie desprovista de vegetación y sometidos a un amplio conjunto de condiciones ambientales muy restrictivas. Esta situación hace que los ecosistemas dunares sean susceptibles de ser invadidos por especies exóticas de carácter primocolonizador que ocupan los espacios abiertos.

Las especies invasoras suelen ser bien de ciclo de vida corto, anuales, formando en pocos años un importante banco de semillas que asegura su permanencia y expansión (*Arcthoteca calendula*, *Oenothera drummondii*), o bien especies de más lento crecimiento, herbáceas perennes, que por medio de rizomas y estolones, además de formar bancos de semillas, permiten una efectiva supervivencia y expansión de las poblaciones (*Carpobrotus edulis*) (Campos *et al.*, 2004).

La elevada presión humana sobre las zonas litorales, resultado del desarrollo turístico de sol y playa de los últimos treinta-cuarenta años, es una de las principales causas de la introducción de especies exóticas en sistemas dunares activos (van der Meulen and Salman, 1996). La construcción de urbanizaciones, infraestructuras de uso público y el elevado flujo de personas, sobre todo en los meses estivales, asegura la continua entrada de propágulos de especies foráneas y la existencia de áreas perturbadas (pisoteo, cambio de estructura del suelo y enriquecimiento en nutrientes,...), donde estas especies pueden instalarse y expandirse. Consecuencia también de la presión turística, es la proliferación de zonas ajardinadas construidas sobre los sistemas dunares o en áreas cercanas, con objetivos estéticos y/o de

protección frente a la erosión marina. Estos jardines suelen estar formados por especies exóticas, algunas de ellas potencialmente invasoras (Gallego Fernández *et al.*, 2006).



Foto 3.11. *Opuntia tuna* (chumbera) sobre dunas.

La presencia de especies exóticas sobre las dunas costeras depende de la intensidad de la presión humana que soportan. En general, el número y abundancia de estas especies introducidas están relacionados con las intervenciones de gestión del sistema dunar realizadas en el pasado y en la actualidad. Los objetivos de las introducciones han estado relacionados con intervenciones para el control de la erosión, la estabilización dunar y motivos estéticos (normalmente en playas y sistemas dunares urbanos).

Las especies introducidas han sido tanto herbáceas como leñosas. Cabe destacar que la especie exótica más frecuentemente utilizada por los gestores de costas en España ha sido *Carpobrotus edulis* (uña de león). Su introducción se ha realizado a lo largo de todo el siglo XX y, aún en los primeros años del XXI ha sido plantada en numerosos sistemas dunares.

Actualmente, no existen datos a nivel nacional sobre la abundancia de especies exóticas en los sistemas dunares españoles. Tras una revisión bibliográfica de la literatura científica existente, sólo se han encontrado tres trabajos que permiten tener estimaciones de la incidencia de estas especies en las costas españolas.

Campos *et al.*, (2004) estudiaron la flora exótica de Cantabria y País Vasco, y si bien no ofrecen datos de presencia relativa de especies exóticas, sí alertan sobre el elevado número de estas especies existentes en esta zona costera de acantilados, dunas y marismas.

A su vez, Sobrino *et al.*, (2002) detectaron la presencia de un 20% de especies exóticas en la zona litoral de Rieras Baix Camp en Tarragona.

El único trabajo específico de dunas costeras es el de Gallego-Fernández *et al.*, (2006b). Estos autores analizan la vegetación exótica presente en cinco sistemas dunares de Cádiz, sobre unas 875 ha de superficie. De las 331 especies registradas, 27 fueron exóticas (8,2%), de las que doce pueden ser consideradas invasoras. La presencia de exóticas varió según el sistema dunar estudiado, registrándose el mayor porcentaje de estas especies en el

sistema dunar de Tres Piedras (Chipiona), con un 25,3% de la flora total. Esta elevada proporción es consecuencia del acusado nivel de degradación ambiental de este sistema dunar semiurbano, donde una importante proporción de la superficie de las dunas ha sido tradicionalmente ajardinada y presenta una gran presión turística. Los otros sistemas dunares, todos ellos total o parcialmente protegidos por la legislación ambiental andaluza, presentaron valores similares de presencia de exóticas (7-8,9%). El valor más bajo se registró en el sistema dunar de Valdevaqueros (Tarifa), con sólo un 4,3% de flora exótica.

En la Tabla 3.7. se muestran las veintinueve especies exóticas registradas en zonas dunares costeras del norte y sur de España (Campos *et al.*, 2004; Gallego Fernández *et al.*, 2006).

La erradicación de especies exóticas invasoras de los ecosistemas naturales, en general, y de los sistemas dunares, en particular, es una de las asignaturas pendientes en la gestión para la conservación y restauración. Debido a su impacto real o potencial sobre la biodiversidad autóctona y los procesos de los ecosistemas, toda especie exótica debe ser eliminada mediante un plan de erradicación sostenido en el tiempo y en el espacio. Actualmente, es frecuente que la administración estatal o autonómica y asociaciones ciudadanas de protección de la naturaleza acometan actuaciones de erradicación de estas especies. Sin embargo, estas actuaciones suelen ser puntuales, sin continuidad temporal y escasa amplitud espacial, centradas en una o dos especies exóticas (normalmente *Carpobrotus edulis*), y en la mayor parte de los casos, restringidas a espacios naturales protegidos.

Tabla 3.7. Especies exóticas registradas en dunas costeras activas en diferentes estudios realizados en el País Vasco y Andalucía (Campos et al., 2004; Gallego Fernández et al., 2006).

	PAÍS VASCO	GOLFO DE CÁDIZ
Acacia retinoides		+
Agave americana		+
Aloe vera	+	
Arctotheca calendula	+	+
Arundo donax	+	+
Baccharis halimifolia	+	
Carpobrotus edulis	+	+
Centranthus ruber	+	
Conyza bonariensis	+	
Conyza sumatrensis	+	
Eucalyptus globulus		+
Euphorbia polygonifolia	+	
Lobularia maritima	+	
Myoporum acuminatum		+
Nicotiana glauca		+
Oenothera drummondii	+	+
Oenothera glazioviana	+	
Oenothera gr. biennis	+	
Oenothera x fallax	+	
Opuntia tuna		+
Oxalis pes-caprae		+
Paspalum vaginatum	+	
Pittosporum tobira	+	
Solanum Sodomeum		+
Spartina patens	+	
Stenotaphrum secundatum	+	
Tetragonia tetragonioides	+	
Yucca gloriosa	+	
Yucca sp.		+

4

Usos e impactos

4.1

Introducción

La costa ha atraído desde antiguo la presencia del hombre, si bien su influencia en el pasado está parcialmente oscurecida debido a las fluctuaciones del nivel del mar (Nordstrom, 2000). A lo largo de la historia, el impacto sobre la costa ha variado en intensidad dependiendo de cuestiones sociales y económicas. La capacidad del hombre de producir impacto (intensidad y extensión) está determinada por el tamaño de las poblaciones y el grado de desarrollo tecnológico, produciéndose a lo largo de los últimos dos siglos las mayores intervenciones y transformaciones del paisaje costero, en general, y de los sistemas dunares, en particular.

Cuando se produce el encuentro entre el hombre y un territorio, en este caso las dunas costeras, los sistemas naturales son perturbados, variando el grado de perturbación desde casi imperceptible a catastrófico (Carter, 1995). En general, se puede decir que las actividades humanas sobre las dunas costeras han causado un extenso cambio ecológico y morfológico. La destrucción y fragmentación de los sistemas dunares costeros y de los procesos relacionados con su formación y mantenimiento han conducido a la pérdida de un buen número de hábitats costeros (playas, dunas, humedales) y al incremento del número de especies de organismos amenazados.



Foto 4.1. Yacimiento romano de Baelo Claudia en la Ensenada de Bolonia, Tarifa (Cádiz).

La degradación y desaparición de las dunas debido a la actividad humana es consecuencia de las seis principales actividades que el hombre desarrolla en la costa (Ketchum, 1972) y que en todos los casos afecta, en mayor o en menor medida, a las dunas costeras: 1) Residencial y recreativa; 2) Industrial y comercial; 3) Disponibilidad de zonas de vertidos; 4) Agricultura, acuicultura y pesca; 5) Reservas naturales; 6) Militar y estratégica.

La presión humana ha incrementado la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros frente a perturbaciones naturales (García Mora *et al.,* 2001; Martínez *et al.,* 2006). Entre otros, el incremento de la ocupación urbanística del espacio litoral y la protección y regeneración artificial de la costa (por ejemplo, regeneración de playas, paseos marítimos) que resultan en la pérdida de

dunas costeras y la alteración de la dinámica sedimentaria litoral. Todo ello, ha llevado en numerosas situaciones a la pérdida de playas, y por tanto, a la pérdida de un importante recurso generador de oportunidades de desarrollo económico y empleo (Heinz III Center for Science, Economics and the Environment 2000).

A nivel europeo, las dunas costeras, que en su vertiente atlántica suponen alrededor de 5.300 km^2, representan actualmente sólo un 75% del área existente hace tan sólo un siglo. De las existentes hoy en día alrededor de un 45% permanecen intactas de forma natural, cifra que en el Mediterráneo se reduce al 25%. La tasa de desaparición de dunas y playas en Europa está estimada para las últimas décadas en aproximadamente 30 ha/año (Salman y Kooijman, 1998).

En España, con una longitud de costa de unos 7.880 km., la proporción que corresponde a costa con sistemas dunares es de un 40%, y alrededor de un 45% de los sistemas dunares permanece natural.



Impactos de los sistemas dunares

A continuación, se presentan los impactos comunes a los sistemas dunares costeros (Ranwell, 1972; Ranwell y Boar, 1986; Carter, 1988):

4.2.1 Extracción de arenas

Se entiende como tal, la extracción de arena de las dunas o el dragado de la franja marina inmediatamente contigua, lo que modifica el balance sedimentario e impide el crecimiento dunar en altura. Esto facilita la erosión marina, la destrucción de la vegetación y la movilización de los arenales interiores. No obstante, la extracción de arenas de sistemas dunares costeros está prohibida en España (Ley de Costas, 1988).

Los dragados que afectan a las dunas costeras son los realizados a cierta distancia de la costa y en estuarios confinados por sistemas de playa-dunas, en los que el material arenoso es exportado fuera del área de actuación de los oleajes. Esto provoca la recesión de las playas y sistemas dunares, con la consiguiente aparición de los perfiles subverticales característicos de los frentes dunares.

4.2.2 Extracción de agua freática

La extracción de agua para uso doméstico e industrial, agota en ocasiones y de forma permanente la capa freática subyacente, secando las zonas húmedas propias de los sistemas dunares o su entorno próximo, los cuales dependen del acuífero dunar. Uno de los ejemplos más destacados es la desecación de las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana (Serrano y Serrano, 1996). La extracción de agua para cultivos también puede ocasionar fenómenos de intrusión de agua salada.



Foto 4.2. Extracción extensiva de arenas en las dunas de Guadalquitón (San Roque, Cádiz)

4.2.3 Uso agrícola

Otro de los impactos comunes a los sistemas dunares costeros es el que se produce por cultivo directo sobre las dunas, eliminando la vegetación, modificando el relieve y alterando gravemente las características del suelo y la capa freática subyacente mediante la roturación y uso de fertilizantes y plaguicidas.



Foto 4.3. Eliminación de dunas para uso agrícola. Isla Cristina (Huelva).

4.2.4 Uso ganadero

Pastoreo de ganado, cuyo pisoteo produce un alto grado de erosión y compactación del suelo, alterando la vegetación y afectando directamente a la morfología y fisiología de las plantas, e indirectamente, a la capacidad de interceptación de la arena.

Un uso que suele ser muy común en los entornos dunares es el pastoreo de rebaños de cabras, vacas, etc., debido a que en los lugares cercanos a la costa, las zonas de pasto escasean. La zona de trasduna ofrece pastos suculentos para el ganado por las condiciones que se dan en este ecosistema, ya que el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie y a que el clima es muy favorable.

El pastoreo controlado hace que aumente la diversidad de especies herbáceas en la zona de trasduna, sin embargo, en la duna propiamente dicha la actividad de los animales genera un fuerte impacto por pisoteo, disminuyendo la cobertura vegetal y aumentando la vulnerabilidad de la duna a la



Foto 4.4. Pastoreo de ganado ovino del pastizal de dunas.

acción del viento. Además, los rebaños suelen seguir siempre las mismas rutas, lo que hace que se formen caminos entre las dunas. A partir de estos caminos se forman pasillos que fragmentan el sistema dunar, los cuales aumentan progresivamente su anchura debido a la acción del viento, hasta que al final quedan pequeños montículos aislados, testigos de las dunas que existieron previamente.

4.2.5 Plantaciones forestales

Las plantaciones forestales sobre sistemas dunares costeros activos han tenido como objetivo su estabilización. Tradicionalmente, los sistemas dunares han sido considerados como zonas marginales de escaso interés económico y social. En numerosos casos se han percibido como una amenaza, ya que zonas de interés humano como pueblos, cultivos o infraestructuras situadas junto a estos sistemas han visto cómo las arenas de dunas avanzaban enterrando todo a su paso. En la mayor parte de las ocasiones, la movilidad de las arenas se debió a un proceso de desestabilización de las dunas provocado por una inadecuada intervención humana.

La estabilización de campos dunares activos con plantaciones forestales es una actuación que se viene realizando desde el siglo XIV en Gran Bretaña, XVII en Japón, XVIII en Francia y España, y posteriormente, en numerosos lugares del mundo.



Foto 4.5. Plantación de pinos en las dunas de Guardamar (Alicante).

En España, el primer intento de estabilización se produce en el sistema dunar de Doñana en 1737 utilizando el pino piñonero, continuándose en 1850 y a lo largo del la primera mitad del siglo XX (Granados *et al.,*1984, 1988). A lo largo del siglo XIX, el problema de la amenaza sobre los sistemas dunares costeros móviles se plantea en numerosas zonas de las costas españolas, tanto atlánticas como mediterráneas (García Novo y Marín Cabrera, 2005). Esta situación hizo que, a lo largo de los primeros setenta años del siglo XX, el Estado se encargase de proceder a la fijación de las dunas (Kitt y Tasara, 1946; Pipió i Gelabert, 1988). Las especies utilizadas fueron principalmente pinos (*Pinus pinea, P. pinaster, P. halepensis, P. radiata*), arbustos como la retama blanca en el Golfo de Cádiz (*Retama monosperma*), barrón (*Ammophila arenaria*) y plantas exóticas como diversas especies de los géneros *Eucalyptus, Acacia*. Otra especie que también se plantó pero con poco éxito fue *P. canariensis.*

En general, todas las plantaciones realizadas para la fijación de arenas no sólo han conseguido la estabilización de los sistemas dunares, sino que han

conducido a la disminución o desaparición de comunidades y especies autóctonas de dunas naturales, muchas de ellas ahora amenazadas (Muñoz Reinoso, 2004). El atemperamiento del estrés ambiental de los sistemas dunares (insolación, altas temperaturas, estrés hídrico, pobreza en nutrientes, movilidad de substrato,...) ha contribuido al declive de ciertas especies y comunidades, y a la formación de "otro tipo" de comunidades formadas por especies autóctonas y/o exóticas (Gallego Fernández et al., 2006).

En general, las plantaciones arbóreas de los sistemas dunares son percibidas erróneamente como "bosques costeros", no sólo por la población, sino también por las administraciones nacionales y regionales, políticos y algunos científicos. Esta situación supone un obstáculo importante para la recuperación de los ecosistemas dunares costeros mediante la eliminación de las plantaciones existentes y la restauración de las comunidades y procesos geomorfológicos y ecológicos característicos de estos sistemas naturales.

Actualmente, la percepción de los sistemas dunares activos ha cambiado, ya que son considerados otro ecosistema natural más, con valores intrínsecos propios y capaces de proporcionar numerosos y valiosos bienes y servicios en su estado natural.

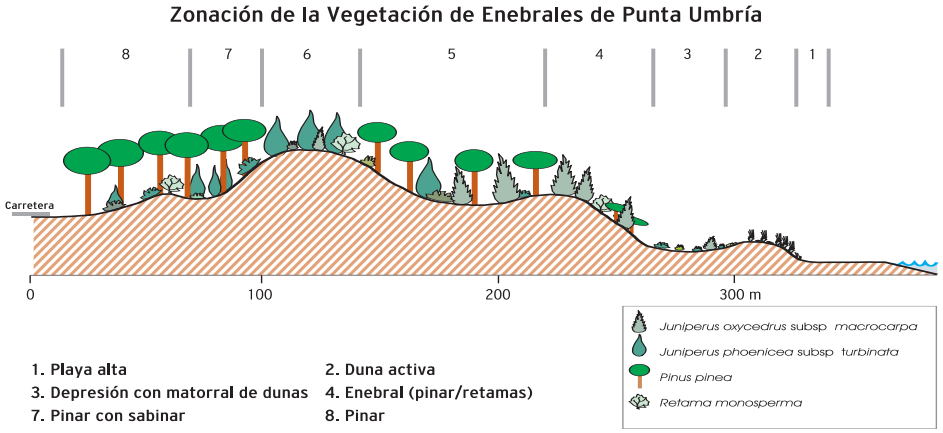


Figura 4.1. Plantación de pinos piñoneros sobre las dunas realizada en 1905 en Enebrales de Punta Umbría (Huelva).

4.2.6 Urbanización

A lo largo del último siglo, se ha producido un incremento exponencial de la población humana en las zonas costeras debido a diversas causas sociales y económicas. En España, el 44% de la población vive en el 7% del territorio que supone los municipios costeros. Si a estos datos se añaden los millones de turistas que visitan las costas durante los meses estivales, el resultado es que en verano el litoral español es uno de los más densamente poblados del planeta.



Foto 4.6. Destrucción de sistema dunar por la urbanización de La Antilla (Lepe, Huelva).

De todos es conocida la presión urbanística a la que están sometidas nuestras costas, y en consecuencia, los sistemas dunares (García Mora *et al.*, 1988). La fuerte demanda del territorio en los medios costeros ha puesto en evidencia la fragilidad del litoral. La urbanización sobre sistemas dunares implica su destrucción completa, además de producir un aumento de la presión de uso en zonas adyacentes.

4.2.7 Actividades recreativas

Las dunas son formaciones geomorfológicas costeras muy atractivas para uso recreativo, pero el principal efecto de la presión humana en el entorno dunar es el derivado del pisoteo indiscriminado al que se ve sometida la vegetación. Normalmente, el paso de las personas a través de un sistema dunar se debe a la existencia de un aparcamiento, una carretera o camino, etc. en la parte trasera de la duna, la cual hay que cruzar para acceder a la playa.

Además, cierto número de visitantes se deciden a explorar el sistema dunar, lo cual provoca aún más daños en el equilibrio del mismo. El simple hecho de que se atraviese la duna para ir a la playa provoca un fuerte impacto, ya que, según numerosos estudios, el deambular de los visitantes tiende a fragmentar el cordón dunar mediante la creación de pasillos, que favorecen la acción erosiva del viento, dando lugar a la formación de brechas en los cordones dunares que fragmentan el sistema dunar y aumentan su vulnerabilidad.

Las actividades de limpieza de playa que se realizan periódicamente en la mayor parte de las playas de nuestro litoral contribuyen a la degradación y eliminación de su vegetación y de las formas de acumulación embrionarias. Esto significa que en la mayoría de ellas no se puede

crear la barrera natural contra la erosión marina que son los sistemas dunares. El tamizado de las arenas elimina parte del banco de semillas y de rizomas y se eliminan los nutrientes que aporta el mar y la acción eólica.

Por otra parte, el tránsito de vehículos por la playa seca aumenta la compactación de la arena, impidiendo la germinación de las especies vegetales. Se destruyen las dunas embrionarias, disminuyendo la capacidad de absorción de la energía del oleaje sobre la línea de costa y se incrementan los efectos erosivos en la playa seca.

Una actividad de tipo recreativo que cada vez prolifera más en el litoral son los paseos a caballo. Su impacto sobre las dunas es considerable, ya que un elevado número de estos animales sigue el mismo camino, haciendo que la vegetación se pierda en hileras. La ausencia de vegetación hace a la duna más vulnerable a la acción del viento en estas zonas, apareciendo surcos que fragmentan el cordón dunar. El viento, al pasar por estos "pasillos", los va agrandando hasta que al final tan sólo queda del cordón dunar unos pequeños montículos, en el mejor de los casos. Además, estas actividades modifican el relieve de la duna y de la playa, disminuyen la heterogeneidad geomorfológica, aumentan la compactación del suelo, destruyen o alteran la vegetación, etc.

Finalmente, consideramos la construcción de campos de golf. Este uso elimina totalmente el ecosistema, ya que se destruye la topografía y se sustituye la vegetación psamófila típicamente dunar por una pradera que debe recibir cuidado continuo. Otro impacto negativo que producen los campos de golf en la línea de costa se debe a la explotación de los acuíferos, ya que necesitan gran cantidad de agua para su riego. Esto da lugar a un gran descenso en el nivel freático, y en la consecuente intrusión de la cuña de agua salada, la cual contamina los pozos situados cerca de la costa.



Foto 4.7. Fragmentación del cordón dunar costero por visitantes de la playa (Camposoto, Cádiz).



Foto 4.8. Fragmentación del sistema dunar por la creación de senderos a pie (Playa de la Hierbabuena, Barbate, Cádiz).



Foto 4.9. Campo de Golf sobre las dunas de El Saler (Valencia).

4.2.8 Otras causas antrópicas

Aunque en la mayoría de los casos no se aprecia, otra de las potenciales amenazas sobre los cordones dunares es la reducción del aporte de arena por la construcción de barreras físicas que interrumpen el ciclo sedimentario natural. Estas barreras pueden tener influencia en su entorno más próximo (caso de los espigones) o en lugares lejanos al lugar donde se localiza el pro-

blema (caso de las presas y embalses). A continuación, se analizan las actuaciones antrópicas más relevantes, susceptibles de reducir el aporte de arena al sistema playa-dunas:

- **Construcción de obras marítimas de protección y defensa** (puertos, diques, espigones, etc.). Ideadas para la prevención de la erosión, han modificado de forma sustancial la dinámica litoral y el aporte sedimentario a las playas y sistemas dunares. Este tipo de obras interrumpe el aporte de arena a la playa. El impacto al principio, sólo es aparente; pero cuando pasa el tiempo, el sistema dunar pierde su estructura y se desintegra.

- **Construcción de presas en cuencas hidrográficas**. En la mayoría de los casos, los aportes fluviales constituyen la fuente principal de aporte de sedimentos al litoral. Los ríos pueden transportar importantes volúmenes de sedimentos, sobre todo en época de crecida. La disminución de la velocidad del curso fluvial cuando llega a la desembocadura, provoca primero el depósito de las partículas que transportaba por saltación, y más tarde, la sedimentación de las partículas en suspensión. Esto ocasiona una gradación del tamaño y la densidad de las partículas depositadas en el fondo. Los sedimentos son distribuidos por acción de la dinámica litoral a lo largo de la costa, permitiendo el equilibrio sedimentario de las playas. Al realizar obras tales como presas o embalses aguas arriba de los ríos, se interrumpe el aporte de sedimentos del mismo a la desembocadura, privando a las playas de una importante fuente de sedimentos, rompiendo así su equilibrio sedimentario.



Foto 4.10. Construcción de diques y puertos en Guardamar (Alicante).

- **Dragados**. Los dragados que afectan a la línea de costa son los realizados a cierta distancia de la misma y en estuarios confinados por sistemas de playa-dunas en los que el material arenoso es exportado fuera del área de actuación de los oleajes. Esto genera una recesión de las playas y sistemas dunares, con la consiguiente aparición de los perfiles subverticales característicos de los frentes dunares.

5

Diagnóstico

5.1

Introducción

A la hora de abordar cualquier tipo de actuación de gestión en un ecosistema, incluida la restauración, se debe de establecer como primer paso cuál es el estado de conservación/degradación y cuáles son los factores que lo han llevado a tal situación. Para ello, es necesario realizar un estudio detallado de los elementos físicos y biológicos que forman dicho ecosistema, así como de los procesos y relaciones que los mantienen en el espacio y en el tiempo (procesos geomorfológicos y ecológicos).

En los últimos años se han desarrollado numerosos índices para evaluar la sensibilidad o vulnerabilidad de las zonas costeras debida a factores naturales o antrópicos. Se entiende por vulnerabilidad la pérdida de capacidad de un ecosistema de retornar al estado original después de una perturbación. Vulnerabilidad es un antónimo de elasticidad (Orians, 1975) o resiliencia (Pimm, 1991).

Asimismo, existe un amplio abanico de índices que se han formulado como herramienta de diagnóstico y gestión en la prevención de riesgos derivados del aumento potencial del nivel del mar (Gornitz, 1990, 1992; Hughes *et al.*, 1992; Daniels *et al.*, 1992; entre otros), en la identificación de áreas susceptibles de erosión (Quelennec, 1989; Gornizt y Kanciruk, 1989) y en la elaboración de sistemas de información costera (Flemming y Townend, 1989; Williams *et al.*, 1993). Estos índices suelen aplicar factores hidrodinámicos, climáticos y antrópicos. Los índices específicos para determinar la capacidad de respuesta a la perturbación natural y humana de sistemas dunares activos europeos son los elaborados por Bodere *et al.,* (1991) en País de Gales y Bretaña Occidental; Williams *et al.*, (1993), para Inglaterra y Williams *et al.*, (1994), para el SW de la Península Ibérica. Estos índices fueron obtenidos a partir de listas de control.

A pesar de los numerosos índices desarrollados por los diversos investigadores, no existe en la actualidad uno que esté totalmente aceptado por la comunidad científica. No obstante, al objeto de aportar información sobre el conjunto de variables que deben ser analizadas a la hora de realizar un diagnóstico del estado de un sistema dunar y un posible método de analizar la vulnerabilidad de estos ámbitos litorales, se presenta a continuación el índice de vulnerabilidad desarrollado por García Mora y colaboradores (2001).

5.2 Vulnerabilidad del sistema dunar

García Mora y colaboradores (2001) elaboraron un **índice de vulnerabilidad** específico para las costas españolas, aunque desarrollado en el Golfo de Cádiz, se amplió posteriormente a una zona geográfica más amplia (Williams *et al*., 2001), y últimamente, ha sido aplicado en costas tropicales del Golfo de México (Martínez *et al*., 2006).

En este índice de vulnerabilidad, además de variables geomorfológico-sedimentarias, marinas, climáticas y antrópicas, se han incluido variables ecológicas, que tienen en cuenta el estado de la vegetación dunar. Mediante la aplicación del índice a partir de una lista de control, es posible sectorizar el frente costero y establecer comparaciones en un contexto espacial, facilitando el establecimiento de prioridades de conservación y gestión, incluida la restauración. Asimismo, permite establecer el origen de la alteración para diseñar medidas correctoras.

La vulnerabilidad de un sistema dunar se determina mediante el denominado "índice de vulnerabilidad" que sintetiza de forma cuantitativa la capacidad de respuesta de un sistema dunar costero ante los diversos procesos que interactúan y determinan los ajustes y la evolución del frente costero. El índice de vulnerabilidad se termina evaluando de 0 a 4 las 54 variables descriptivas del sistema dunar que se establecen en la Tabla 5.1, agrupadas en función del tipo de proceso en el que se integran: geomorfo-sedimentario, oceanográfico, climático, ecológico y antrópico. El valor de 0 a 4 se asigna en función de un valor físico cuantitativo de la variable, de tal manera que el valor 0 corresponde a la condición óptima para la conservación del sistema dunar, mientras que el valor 4 corresponde al caso opuesto.

El rango de valores que toma cada variable se ha basado en información obtenida a partir de la bibliografía existente así como del consenso de un grupo multidisciplinar e internacional de expertos en zonas costeras (Proyecto Dunes-ELOISE, V Programa Marco UE). Considerando cada grupo de variables independientemente, se obtiene un índice de vulnerabilidad parcial que permite identificar el tipo de proceso dominante en la pérdida de resiliencia del sistema: a) características geomorfológicas, b) efecto erosivo marino, c) efecto erosivo eólico, d) características de la cubierta vegetal o, e) efecto de los impactos humanos. La aplicación de este índice se ha demostrado útil en un amplio rango de sistemas dunares costeros. Las bases conceptuales de este diagnóstico, así como la metodología empleada en su aplicación a los sistemas dunares costeros se exponen a continuación.

Para la realización del estudio de vulnerabilidad, los sistemas dunares deben clasificarse previamente en tramos con características homogéneas y aplicarse una lista de control a un sector costero de 100m representativo del mismo.

En el Tabla 5.1., se muestra la *lista de control* utilizada para el cálculo del *índice de vulnerabilidad.*

Tabla 5.1. Lista de control aplicada en el estudio de vulnerabilidad del sistema dunar

A. ÍNDICE GEOMORFOLÓGICO-SEDIMENTARIO DEL SISTEMA DUNAR (IGD)

1. Longitud del sistema dunar activo (Km)	☐0 >20	☐1 >10	☐2 >5	☐3 >1	☐4 >0.1
2. Anchura del sistema dunar activo (Km)	☐0 >2	☐1 >1	☐2 >0.5	☐3 >0.1	☐4 <0.1
3. Anchura de la duna primaria en % de la del sistema dunar activo	☐0 <5	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
4. Altura modal de las dunas del sistema dunar costero (m)	☐0 >25	☐1 >10	☐2 >5	☐3 >1	☐4 <1
5. Altura modal de la duna primaria (m)	☐0 >25	☐1 >15	☐2 >10	☐3 >5	☐4 <5
5a. Si cordones dunares paralelos: nº	☐0 ≥10	☐1 >4	☐2 >2	☐3 2	☐4 1
5b. Si duna rampante: pendiente de la base	☐0 Suave		☐2 Media		☐4 Alta
5c. Si duna sobre acantilado: altura del acantilado (m)	☐0 <2		☐2 2-5		☐4 >5
6. Superficie relativa de las depresiones interdunares húmedas	☐0 Media		☐2 Escasa		☐4 Ninguna
7. Grado de fragmentación del Sistema dunar.	☐0 Bajo		☐2 Medio		☐4 Alto
8. Granulometría de la ladera de barlomar de la duna primaria (ϕ)	☐0 ≤-1	☐1 0	☐2 1	☐3 2	☐4 3

B. ÍNDICE DE INCIDENCIA MARINA (IIM)					
1. Fetch geográfico (Km)	☐0 <25	☐1 <100	☐2 <250	☐3 >500	☐4 >1000
2. Estado modal de la playa	☐0 Disipa.		☐2 Interm.		☐4 Reflej.
3. Anchura de la zona intermareal (Km)	☐0 >0,5	☐1 >0,2	☐2 >0,1	☐3 >0,05	☐4 <0,05
4. Carrera de marea (m)	☐0 <2		☐2 2-4		☐4 >4
5. Exposición costera [1]	☐0 10-45º		☐2 0-10º		☐4 0º
6. Nº de barras arenosas sumergidas o emergidas	☐0 >1		☐2 1		☐4 0
7. Anchura de la playa seca (m)	☐0 >75	☐1 <75	☐2 <25	☐3 <10	☐4 0
8. Superficie relativa de los cortes en la duna primaria debidos al oleaje	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 <20%	☐3 <50%	☐4 >50%
9. % de la longitud de la duna primaria con escarpes de erosión debidos al oleaje	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
10. Granulometría del sedimento de la playa seca (ϕ)	☐0 <0		☐2 0-2		☐4 >2

C. ÍNDICE DE INCIDENCIA EÓLICA (IIE)

1. Aporte de sedimento a la duna primaria	☐0 Alto		☐2 Moderado		☐4 Bajo
2. % de la playa seca ocupado por dunas embrionarias	☐0 >50	☐1 <50	☐2 <25	☐3 <5	☐4 0
3. % sobre la superficie del sistema dunar ocupado por cubetas de deflación	☐0 ≤5%	☐1 >5%	☐2 >10%	☐3 >20%	☐4 >40%
4. % sobre la superficie de la duna primaria ocupado por pasillos de deflación	☐0 <5%	☐1 <10%	☐2 <25%	☐3 <50%	☐4 >50%
4.1. Si pasillos de deflación, profundidad como % de la altura de la duna primaria	☐0 <5%	☐1 <10%	☐2 <25%	☐3 <50%	☐4 >50%
5. % de la superficie de la playa seca cubierto por residuos orgánicos	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 >5%	☐3 >25%	☐4 >50%
6. % de la superficie de la playa seca con cobertura de gravas	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 >5%	☐3 >25%	☐4 >50%
7. % de la superficie de la playa seca con cobertura de conchas	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 <25%	☐3 <50%	☐4 >50%
8. % de la superficie de la ladera de barlomar de la duna primaria con cobertura vegetal	☐0 >90	☐1 >60	☐2 >30	☐3 >10	☐4 <10
9. % de la superficie del sistema dunar sin vegetación	☐0 <10	☐1 <20	☐2 <40	☐3 <75	☐4 >75

D. ÍNDICE DE CARACTERÍSTICAS DE LA CUBIERTA VEGETAL (ICV)

1. % de la superficie de la playa seca cubierto por especies Tipo III	☐0 >50	☐1 >25	☐2 >15	☐3 >5	☐4 <5
2. % de la sup. de la ladera de barlomar de la duna primaria cubierto por especies Tipo II	☐0 >90	☐1 >60	☐2 >30	☐3 >15	☐4 <15
3. % de especies Tipo II en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 <5	☐1 <15	☐2 <30	☐3 <60	☐4 >60
4. % especies Tipo I en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 <1	☐1 >1	☐2 >5	☐3 >10	☐4 >30
5. % de especies exóticas en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 0	☐1 <1	☐2 <5	☐3 <15	☐4 >15
6. % de especies Tipo I y II en los primeros 100 m a sotamar de la duna primaria	☐0 >75	☐1 >50	☐2 >25	☐3 >10	☐4 <10
7. % de plantas vigorosas en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 >75	☐1 >50	☐2 >25	☐3 >10	☐4 <10
8. % de plantas con raíces expuestas en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 <5	☐1 >5	☐2 >15	☐3 >25	☐4 >50
9. % de plantas con evidencias de daño físico en la ladera de barlomar de la duna primaria	☐0 <5	☐1 >5	☐2 >15	☐3 >25	☐4 >50
10. % eliminación antrópica de cobertura vegetal en ladera de barlomar de la duna prim.	☐0 <10	☐1 >10	☐2 >25	☐3 >50	☐4 >75

(1) Por exposición costera se refiere al ángulo formado por la dirección dominante del oleaje en profundidades indefinidas y el ángulo del oleaje dominante en rotura.

E. ÍNDICE DE PRESIÓN DE USO (IPU)

1. Presión de visitantes	☐0 Baja		☐2 Moderada		☐4 Alta
2. Frecuencia de visitantes	☐0 Baja		☐2 Moderada		☐4 Alta
3. Dificultad de acceso	☐0 Alta		☐2 Moderada		☐4 Baja
4. Tránsito de vehículos sobre el sistema dunar activo	☐0 Ninguno		☐2 Alguno		☐4 Elevado
5. Tránsito de vehículos sobre la playa seca	☐0 Ninguno		☐2 Alguno		☐4 Elevadc
6. Paseos a caballo sobre el sistema dunar	☐0 Ninguno		☐2 Alguno		☐4 Elevado
7. % de la superficie de la duna primaria con pasillos de deflación de origen antrópico	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 <25%	☐3 <50%	☐4 >50%
7.1. Anchura de los pasillos de deflación de origen antrópico en la duna primaria (m)	☐0 <1	☐1 <2	☐2 <3	☐3 <5	☐4 >5
7.2. Profundidad de los pasillos como % de la altura de la duna primaria	☐0 <5	☐1 <25	☐2 <50	☐3 >50	☐4 >75
8. % de la superficie del campo dunar ocupada por residuos sólidos urbanos	☐0 0%	☐1 <5%	☐2 <25%	☐3 <50%	☐4 >50%
9. Extracción de áridos	☐0 Nula		☐2 Moderada		☐4 Alta
10. Frecuencia de limpieza de la playa	☐0 Nula		☐2 Moderada		☐4 Alta
11. % playa seca afectada por las actividades de limpieza	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
12. % del sistema dunar activo ocupado por infraestructuras permanentes	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
13. % del sist. activo ocupado por infraestructuras temporales	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
14. % de línea forestal 200 m a sotamar de la duna primaria	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
15. % de línea de cultivos 200 a sotamar de la duna primaria	☐0 0	☐1 <25	☐2 <50	☐3 <75	☐4 >75
16. Pastoreo en el sistema activo	☐0 Ninguno		☐2 Moderado		☐4 Alto
17. Presencia de conejos	☐0 Ninguna		☐2 Moderada		☐4 >Alta

A continuación, se exponen los índices y variables que configuran la lista de control:

Sección A: Índice Geomorfológico-sedimentario del Sistema Dunar (IGD): 8 variables.

Incluye un conjunto de variables que describen las características geomorfológicas y sedimentarias de las dunas costeras. En general, cuanto mayor sea el volumen de sedimento acumulado en el sistema dunar costero mayor será la capacidad de absorción de impactos y más estable será el sistema.

Del mismo modo, la deflación eólica de un volumen determinado de sedimento será más importante en sistemas de menor tamaño, ya que los efectos de la deflación aumentan con la fracción de material dunar erosionado. En este sentido, e independientemente de la tipología del frente costero, la longitud, altura y potencia de las estructuras dunares activas (A1, A2, A3, A4 y A5), se consideran variables determinantes de la capacidad amortiguadora del sistema dunar ante los efectos erosivos marinos y eólicos.

El efecto de los procesos ambientales dominantes sobre la dinámica de las dunas costeras depende del desarrollo potencial del depósito sedimentario. Éste depende, entre otros factores, de las características de la unidad geomorfológica al que está asociado. Por otro lado, el desarrollo y morfología de los frentes costeros depende de forma muy directa de las características del sedimento, tales como granulometría, forma, cohesión y densidad del grano de arena. Se ha considerado que los diámetros de partículas menores aumentarán la fragilidad de la duna costera, ya que los sedimentos finos son más fácilmente transportados por el viento y, por tanto, favorecerán las pérdidas por deflación. La proximidad del nivel freático a la superficie en las depresiones interdunares (A6) aumenta la cohesión entre las partículas y dificulta el transporte eólico del sedimento, a la vez que favorece una mayor cobertura vegetal, disminuyendo la movilidad de las arenas y la pérdida sedimentaria del sistema. En definitiva, la pérdida de superficie ocupada por elementos morfológicos de acumulación de arena así como la fragmentación del sistema dunar en pequeñas unidades aisladas y dispersas (A7), modifica las condiciones ecológicas y geomorfológicas y acelera la degradación y eliminación de las estructuras de acumulación eólica.

Sección B: Índice de Incidencia Marina (IIM): 10 variables.

Los efectos inmediatos del mar sobre la duna costera se centran en el control sobre la disponibilidad de sedimento. Uno de los factores determinantes de la disponibilidad sedimentaria lo constituye la energía potencial del oleaje, que puede relacionarse directamente con la longitud de superficie marina sobre la que el viento sopla en una misma dirección (fetch meteorológico)

(B1). El desarrollo de la duna primaria se ve favorecido en aquellas costas donde la mayor parte de la energía del oleaje es disipada antes de llegar a la playa. Estas playas disipativas se caracterizan por presentar pendientes suaves (B2), constituidas a partir de sedimentos finos o muy finos (B10) y, con frecuencia, presentan crecimiento de barras de arena longitudinales (B6). Las barras longitudinales cumplen una doble función de protección de la playa y de la duna costera. Esta protección se lleva a cabo al actuar como zona de rompiente del oleaje, llegando a disipar entre el 80% y el 95% de la energía del oleaje incidente, y al constituir una reserva de sedimento que garantiza el mantenimiento del equilibrio sedimentario tras los temporales. Otro factor determinante de la disponibilidad de sedimento en las playas es la anchura de la zona intermareal (B3) y de la playa seca (B7), ya que al aumentar la superficie expuesta incrementa el área fuente de sedimento susceptible de ser transportado por el viento, lo que favorece el desarrollo de la duna costera.

Por el contrario, el desarrollo de los frentes costeros se ve limitado en playas reflejantes con carreras de marea pequeñas, donde la zona intermareal presenta unas dimensiones reducidas. Además, aunque este tipo de playas se asocia, generalmente, a granulometrías gruesas o muy gruesas, en el caso del litoral suratlántico, por ejemplo, están asociadas a un predominio de condiciones recesivas. En este tipo de costa la anchura de la playa seca es pequeña, produciéndose, como consecuencia, cortes en la duna primaria durante los temporales (B8) y escarpes de erosión en la ladera expuesta de la duna primaria (B9), lo que potencia los efectos erosivos.

Sección C: Índice de Incidencia Eólica (IIE): 9 variables.

El factor eólico es el responsable directo del modelado dunar y su actuación, y al igual que el factor marino, puede inducir en la costa tanto procesos erosivos como acumulativos o deposicionales. El desarrollo de las estructuras de acumulación eólica va a depender, entre otros factores, de la disponibilidad de sedimento susceptible de ser transportado por el viento (C1) y de la textura de la superficie. El tipo de transporte eólico más importante para la formación de los frentes dunares es el transporte por saltación, con vientos superiores al umbral de inicio de movimiento. Sin embargo, la presencia de cantos rodados (C6), restos de conchas (C7), detritus (C5) y vegetación (C8) en la playa seca incrementan la rugosidad superficial modificando el perfil del viento, así como la velocidad umbral a la que el sedimento es susceptible de ser transportado. Estos factores disminuyen la movilidad de la arena y por tanto, el volumen de sedimento transportado hacia el sistema dunar. En estas circunstancias, se pueden llegar a formar en la zona alta de la berma dunas embrionarias dispersas y de poca entidad (C2), que, si se unen, pueden dar lugar a una nueva duna primaria o bien actuar como almacén de sedimento del sistema dunar ya establecido.

La formación de pasillos de deflación (C4), de origen natural o inducido, incrementa la fragilidad del cordón litoral al producirse puntos de ruptura en la continuidad del frente. De esta forma, se hacen más intensos los efectos erosivos eólicos. Estas zonas de inestabilidad se originan, fundamentalmente, como consecuencia del efecto eólico sobre superficies escasamente vegetadas (C9).

Sección D: Índice de características de la cubierta vegetal (ICV): 10 variables.

Como se ha indicado con anterioridad, numerosos autores han concedido gran importancia a la cubierta vegetal en el estudio de los frentes dunares. En realidad, el origen de los frentes costeros está íntimamente relacionado con la presencia de estructuras vegetales. Su localización inicial suele coincidir con la línea de máximo ascenso del oleaje en mareas vivas equinocciales, donde se produce la acumulación marina de rizomas, semillas y materia orgánica. Estos restos son cubiertos rápidamente por arena, dando lugar a montículos dunares. Estas formaciones son fundamentalmente estacionales, siendo, por regla general, destruidas por los temporales. Sin embargo, si tiene lugar un aporte sedimentario adecuado y si existe una cobertura vegetal óptima, se produce la evolución de estos montículos aislados hacia un cordón embrionario menos efímero que puede alcanzar alturas de 1 ó 2 metros. El crecimiento del cordón embrionario inicialmente es lineal, paralelo a la línea de playa, y su morfología va a depender de la cobertura vegetal. En situaciones caracterizadas por la ausencia de vegetación, el cordón costero desarrolla pendientes más suaves en la ladera expuesta a los vientos marinos y más acusadas (34º) en la ladera de tierra, al contrario de lo que ocurre en caso de existir una cobertura vegetal.

La capacidad de la vegetación de retener el sedimento disponible va a determinar, entre otros factores, los incrementos de volumen sedimentario y el crecimiento potencial en altura de los cordones litorales. Una vez que la vegetación no es efectiva como pantalla eólica, la estructura sedimentaria estabiliza su altura y comienza a avanzar hacia tierra. Teniendo en cuenta esta interrelación entre geomorfología y vegetación a nivel dunar, se ha considerado, además de la cobertura de la vegetación, por su capacidad de fijar y acumular sedimento, el tipo de vegetación instalada en la duna costera. Esto se debe a que el tipo de vegetación va a determinar, en última instancia, el desarrollo y la morfología de la estructura sedimentaria. En este sentido, se han considerado cuatro tipos de vegetación (véase capítulo 3):

a) Tipo III: representado por especies psammófilas capaces de dispersarse por el agua de mar y de soportar altas tasas de enterramiento. Plantas perennes con capacidad de reproducción vegetativa o plantas anuales de verano, con adaptaciones foliares a las condiciones de salinidad, viento, insolación y temperatura de las zonas costeras. Favorecen la formación y el desarrollo de las estructuras de acumulación.

b) Tipo II: herbáceas o leñosas perennes con un sistema radical bien desarrollado y reproducción sexual. Presentan adaptaciones en las estructuras foliares a las condiciones de salinidad, viento, insolación y temperatura de las zonas costeras. No son susceptibles de ser dispersadas por el agua marina y son características de dunas semiestabilizadas. Favorecen la fijación de las arenas, disminuyendo los efectos de la deflación eólica pero no favorecen el crecimiento en potencia de las estructuras dunares.

c) Tipo I: pequeñas herbáceas anuales de invierno con crecimiento rastrero o en roseta, susceptibles de ser enterradas o descalzadas a partir de pequeñas movilizaciones de sedimento. Este tipo de vegetación incrementa su cobertura en condiciones de alta estabilidad del substrato arenoso debido a una tasa muy baja de deposición/erosión, o por un aumento de compactación provocado por el pisoteo.

d) Tipo Neófito, incluyendo aquellos taxones vegetales introducidos recientemente por el hombre en la zona costera. Generalmente, presentan un comportamiento invasor (por ejemplo, *Carpobrotus edulis*), pudiendo llegar a desplazar a la vegetación natural.

En las distintas unidades del sistema dunar, se ha considerado la proporción relativa de cada tipo de vegetación, siendo ésta la relación entre la cobertura de un determinado tipo funcional y la cobertura total de vegetación.

Sección E: Índice de Presión de Uso (IPU): 17 variables.

Los impactos humanos producidos sobre la geomorfología y ecología de los cordones litorales son de dos tipos. Por un lado, los que implican modificación de las características del sistema y por otro, los que implican eliminación parcial o total del mismo. Se han incluido en esta sección los impactos antrópicos que afectan directamente al sistema de dunas mediante:

- Incremento en la desestabilización de la arena y eliminación de la vegetación natural (E1-E7, E9-E11, E16 y E17).

- Modificación de la textura de la capa de arena mediante el aporte de residuos y materiales ajenos a las playas arenosas (E8).

- Fragmentación y eliminación parcial del sistema dunar activo mediante la creación de infraestructuras, o por sustitución de la vegetación natural por cultivos o repoblaciones (E12-E15).

5.2.1 Cálculo del Índice de Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad que se presenta integra el conjunto de variables biológicas y ambientales seleccionadas en una medida de la capacidad de respuesta del sistema dunar costero ante los diversos procesos que interactúan y determinan los ajustes y la evolución del frente costero.

A partir de las listas parciales de control anteriormente expuestas, se obtiene un valor parcial de vulnerabilidad correspondiente a cada sección o grupo de variables, lo que permite identificar el tipo de proceso dominante en la pérdida de elasticidad del sistema.

El índice de vulnerabilidad parcial (IV_p) se calcula como la fracción entre el sumatorio de los valores asignados (V_i) y el sumatorio de los valores máximos posibles de cada grupo de variables (V_{pmax}):

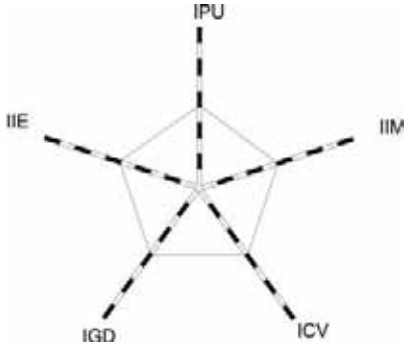
$$IV_p = \Sigma V_i / \Sigma V_{p\,max}$$

El cálculo de la vulnerabilidad se realiza a partir de la media ponderada de los valores de los cinco índices parciales:

$$IV = \alpha\, IV_{IGD} + \beta\, IV_{IIM} + \varphi\, IV_{IIE} + \lambda\, IV_{ICV} + \mu\, IV_{IPU} / (\alpha + \beta + \varphi + \lambda + \mu)$$

Los coeficientes de ponderación $(\alpha, \beta, \varphi, \lambda, \mu)$ de cada uno de los índices parciales de vulnerabilidad depende de cada sistema dunar en particular y la importancia relativa de cada uno de los índices en la vulnerabilidad del sistema dunar.

El valor de los índices parciales y del índice de vulnerabilidad varía entre 0 y 1, representando el valor máximo la menor capacidad de acogida de impactos naturales y humanos. Para facilitar la interpretación de los resultados, los valores de vulnerabilidad parcial ponderados se representan gráficamente sobre cinco ejes. Uniendo los valores parciales de vulnerabilidad se obtiene un polígono de cinco lados, cuya superficie es función del índice global de vulnerabilidad.



- **IGD:** Índice Geomorfo-sedimentario del Sistema Dunar.
- **IIM:** Índice de Incidencia Marina.
- **IIE:** Índice de Incidencia Eólica.
- **ICV:** Índice de Características de la Cubierta Vegetal.
- **IPU:** Índice de Presión de Uso.

Figura 5.1.Diagrama de los índices parciales de vulnerabilidad. Los valores de los distintos índices parciales de vulnerabilidad aumentan con la distancia al punto de intersección de los ejes.

Clasificación de los valores del Índice de Vulnerabilidad

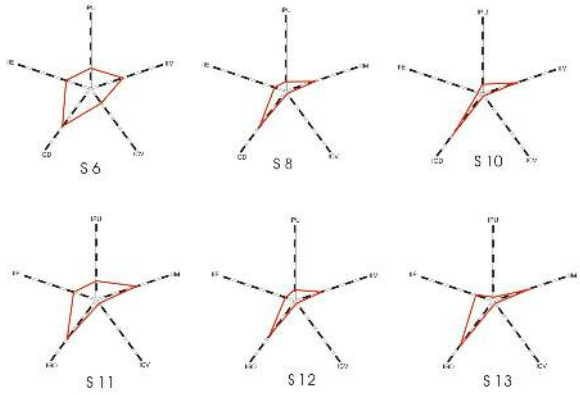
Los resultados de la aplicación de la lista de control sobre los tramos seleccionados se deben estructurar en una matriz de cinco variables (índices parciales de vulnerabilidad) y tantos casos como tramos costeros se hayan considerado (ver Tabla 5.2), donde se ha asignado coeficientes de ponderación iguales a 1 a cada uno de los índices de vulnerabilidad parciales. Al índice de vulnerabilidad global se le asocia una tipo o clase: Clase I ($0 < IV < 0.30$), Clase II ($0.30 < IV < 0.45$), Clase III ($0.45 < IV < 0.60$) y Clase IV ($0.60 < IV < 1$).

Tabla 5.2. Índices parciales y totales de vulnerabilidad

Tramo	IGD	IIM	IIE	ICV	IPU	I. Vulnerabilidad	
0	0,57	0,50	0,62	0,73	0,69	0,62	IV
1	0,53	0,48	0,48	0,49	0,63	0,52	III
2	0,69	0,53	0,45	0,35	0,46	0,50	III
3	0,56	0,50	0,44	0,45	0,57	0,50	III
4	0,44	0,60	0,43	0,48	0,32	0,45	II
5	0,44	0,60	0,47	0,58	0,18	0,46	II
6	0,61	0,43	0,33	0,23	0,25	0,37	II
7	0,67	0,70	0,43	0,58	0,11	0,49	III

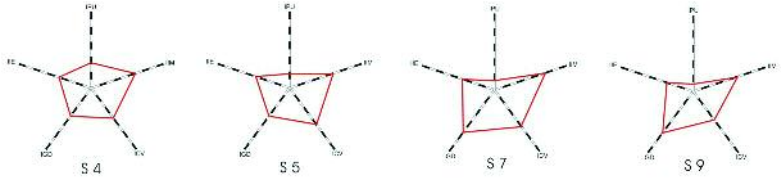
IGD: índice geomorfológico-sedimentario del sistema dunar; IIM: índice de incidencia marina; IIE: índice de incidencia eólica; ICV: índice de características de la cubierta vegetal; IPU: índice de presión de uso.

En las figuras 5.2 y 5.3, se muestran resultados gráficos de la aplicación de la lista de control en casos de vulnerabilidad baja y media (Muñoz Vallés *et al*., 2005). En cada tramo costero se puede identificar, a partir de la visualización de los valores de cada eje, cuál es el origen principal de la vulnerabilidad dunar.



Vulnerabilidad baja

Figura 5.2. Tramos costeros con vulnerabilidad baja. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar.



Vulnerabilidad media

Figura 5.3. Tramos costeros con vulnerabilidad media. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar y a la dinámica sedimentaria erosiva.

6

Técnicas de restauración

6.1

Introducción

La restauración de los sistemas dunares que han sido alterados se consigue mediante la eliminación de las causas que han conducido a su alteración y utilizando técnicas de reconstrucción topográfica y repoblación con vegetación autóctona. Puesto que las dunas costeras son unos sistemas muy dinámicos, los objetivos de restauración se pueden cumplir en un plazo breve, del orden de pocos años.

Es esencial, en cualquier proyecto de restauración, establecer cuáles son los objetivos a alcanzar, siendo deseable que las actuaciones realizadas consigan recuperar la estructura (composición de especies) y funcionamiento (procesos sedimentarios y ecológicos), de forma que el sistema dunar restaurado mantenga una situación de equilibrio dinámico acorde con las características sedimentarias y ecológicas de su entorno.

Como ya se expuso en el Capítulo 5, los proyectos de regeneración de dunas se inician con un estudio detallado de la evolución geomorfológica del sistema dunar y de su uso a lo largo de las últimas décadas. Además, es importante determinar la situación actual de los elementos ecológicos, geomorfológicos y de presión humana que actúan sobre el sistema. Esto permitirá diseñar las futuras fases de actuación. El diseño se realizará en función del uso posterior que vaya a recibir la zona restaurada.

Las técnicas utilizadas para la regeneración de sistemas dunares degradados, o para la construcción de dunas en aquellas áreas donde éstas no existían, pueden dividirse en dos grandes tipos según la magnitud de la intervención y su incidencia ambiental: técnicas de ingeniería convencional y técnicas ecológicas.

Técnicas de ingeniería convencional: Son actuaciones en las que la reconstrucción de la topografía dunar se realiza mediante el aporte de arena con maquinaria. La fuente de arena puede estar o no en el sistema dunar objeto de la actuación. Suele emplearse este tipo de técnicas cuando el objetivo de la reconstrucción dunar es la protección de algún elemento de gran valor económico, social, cultural (como por ejemplo, los yacimientos arqueológicos), e incluso natural, situados en primera línea de costa. Generalmente, son actuaciones realizadas en plazos de tiempo breves (días-semanas), limitadas en el espacio y que requieren una elevada inversión económica. El impacto ambiental es elevado en aquellas zonas que actúan como fuente de arena y en los emplazamientos de las nuevas dunas.

Técnicas ecológicas: Son actuaciones en las que, una vez eliminado o reducido a rangos compatibles el factor o factores que han conducido a la degradación dunar, se procede a la instalación de sistemas de "ayuda" que permitan su reconstrucción mediante procesos naturales. Es una acción relativamente lenta, cuyos resultados se obtienen a medio plazo. Son actuaciones muy poco costosas, en las que la inversión realizada es muy pequeña en relación con los resultados que se obtienen, que, en general, son buenos. No obstante, puesto que se trata de obras en las que es la propia naturaleza la que realiza la mayor parte del esfuerzo (el viento transporta la arena, la vegetación se establece y extiende su cobertura, etc.), los resultados no se aprecian al terminar la actuación sino al cabo de cierto tiempo, dependiendo de varios factores, entre ellos, la climatología, la dinámica sedimentaria, la efectividad de la protección, etc.

Las técnicas de restauración dunar que se abordan en este manual se refieren exclusivamente a las "técnicas ecológicas", si bien algunas actuaciones pueden ser complementadas con técnicas de ingeniería convencional.

Como ya se ha mencionado, las técnicas ecológicas, al igual que la instalación de captadores de arena para lograr una estructura topográfica adecuada y la plantación de vegetación dunar para la fijación de sus superficies, utilizan los procesos naturales para conseguir su función. En decir, el viento transporta la arena que se deposita detrás de los captadores y la vegetación se va estableciendo hasta conseguir una cobertura que permita su fijación y equilibrio. Estas dos actuaciones son los sistemas de regeneración de ecosistemas dunares más utilizados en Europa y consiguen, si previamente se logra una protección efectiva, su restauración en pocos años.



Foto 6.1. Sistema dunar degradado por sobrepresión turística.

Los efectos negativos de la frecuentación humana se resuelven mediante sistemas de protección, siendo los más empleados pasarelas peatonales de acceso a las playas, cerramientos en ecosistemas dunares y eliminación del tráfico rodado sobre las dunas. La información al ciudadano cumple un importante papel en las actuaciones de protección y recuperación de espacios litorales, pues éste no suele tener conocimiento del daño que está produciendo, siendo un caso muy claro el perjuicio que produce el pisoteo sobre la duna. Por otro lado, la divulgación de las actuaciones llevadas a cabo consigue una comprensión y aceptación de los trabajos que se realizan, haciéndole al final cómplice y colaborador, lo que aumenta considerablemente el éxito de la restauración.

Asimismo, las actuaciones de restauración necesitan un mínimo pero continuado mantenimiento, al menos durante los primeros años después de su realización. Esto es necesario no sólo para la reparación de las estructuras de protección, como cerramientos, pasarelas o carteles

que, por causas naturales o la acción vandálica humana suelen sufrir daños. Sino también para la corrección del proceso de captación de arena y para la replantación de las zonas donde la vegetación no ha arraigado suficientemente, ya sea por la movilidad del substrato (enterramiento o erosión) ya por defectos en su establecimiento.

En los apartados siguientes se expondrán detalladamente estas técnicas para la restauración de cordones dunares costeros. Éstos consisten básicamente en la reconstrucción dunar, revegetación, sistemas de protección, sistemas de comunicación y seguimiento de las actuaciones. En el Capítulo 7, se mostrará cómo obtener las plantas necesarias para realizar dicha revegetación.

Es importante recordar que todas estas actuaciones deben realizarse después de, o a la vez que se produce la eliminación total o la reducción a niveles compatibles de las causas que han conducido a la alteración del sistema dunar. Sólo así podrá garantizarse el éxito de las acciones realizadas y se evitará volver a la situación anterior de degradación de las dunas costeras.

1.	*Eliminación de las causas de alteración*
2.	*Reconstrucción dunar*
3.	*Revegetación*
4.	*Sistemas de protección del sistema dunar*
5.	*Sistemas de comunicación de actuaciones realizadas*
6.	*Seguimiento durante las actuaciones de restauración*
7.	*Seguimiento a medio plazo de la restauración*
8.	*Mantenimiento durante los años posteriores*

Tabla 6.1. Actuaciones que deben contemplar los proyectos de restauración de sistemas dunares costeros.

6.2 Reconstrucción morfológica de la duna costera

La reconstrucción de la duna se realiza en zonas donde el cordón dunar ha sido eliminado total o parcialmente o bien está fragmentado longitudinalmente por incisiones, muy frecuentemente ocasionadas por la circulación de personas. También se puede realizar la construcción de un cordón dunar en zonas donde antes no existían, como parte de actuaciones de regeneración de

playas o como actuaciones independientes encaminadas a la protección de intereses de zonas interiores frente a la acción del mar.

Brechas en el cordón dunar
Desaparición de tramos de cordón de dunas
Desaparición total del cordón dunar
Construcción de cordones dunares "de novo"

Tabla 6.2. Situaciones en las que se realizan actuaciones para la reconstrucción dunar.



Foto 6.2. Brechas en un cordón dunar producidas por el paso de usuarios.

El caso más frecuente en nuestras costas es la restauración de cordones fragmentados por la presión ejercida por los visitantes. El efecto de las pisadas, paseos a caballo y uso de vehículos todoterreno produce una considerable alteración de la morfología dunar. En los cordones costeros, el resultado de esta presión se suele traducir en la proliferación de caminos hacia la playa que los atraviesan transversalmente y dan lugar a numerosas incisiones o brechas en el cordón.

Por estas brechas se canaliza el viento, que adquiere una mayor velocidad y potencial erosivo, y poco a poco (o en ocasiones rápidamente), va erosionando los taludes laterales de los segmentos del cordón, aumentando los canales en anchura y profundidad. Esto provoca que se pueda llegar a cortar por completo el cordón dunar. Esta situación repetida a lo largo de un sector de costa puede dar lugar a la desaparición parcial o total del cordón dunar, viéndose reducido en numerosas ocasiones a un conjunto de montículos separados entre sí, con una topografía muy irregular y con una vegetación muy dañada.



Foto 6.3.Restos de un cordón dunar.

En estos casos, la restauración de la duna se inicia mediante la reconstrucción topográfica del cordón adoptando una morfología lo más parecida a la que existía primitivamente o, si no existiera previamente, lo más parecida a la de los sistemas dunares análogos situados en los alrededores. La reconstrucción topográfica debe conseguir una morfología adecuada, lo más aerodinámica posible para evitar la formación de turbulencias. La metodología más utilizada para la reconstrucción de cordones dunares consiste en la utilización de sistemas pasivos de captación de arena. Este método sustituye la función que, de forma natural, ejerce la vegetación pionera en la formación de dunas.

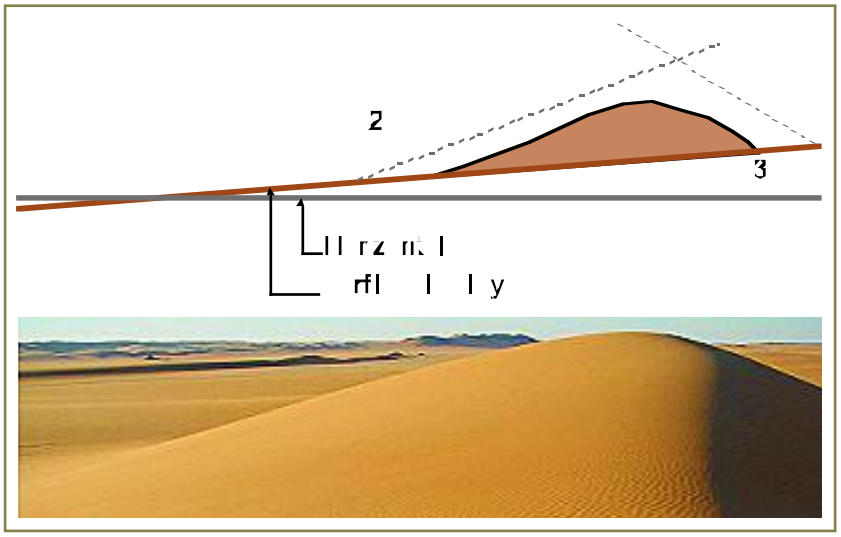


Tabla 6.2.A. Perfil teórico de un cordón dunar.

En otros casos, cuando el sistema dunar se encuentra en un estado muy degradado o la topografía es muy irregular, se puede recurrir a la realización de movimientos de tierras mediante maquinaria. Este sistema se utiliza preferentemente para reconstruir cordones dunares arrasados por temporales excepcionales y, más frecuentemente, para cerrar los pasillos de deflación y brechas de los cordones dunares. En estos casos, se deberá actuar desde la zona de la playa evitando penetrar en zonas con vegetación. El proceso es sencillo, consiste en rellenar los pasillos de deflación con arena extraída de zonas cercanas de la playa, evitando dañar la vegetación y utilizando maquinaria (retroexcavadora, cinta transportadora, etc.,) hasta lograr una morfología uniforme.

Tipo de reconstrución	Ventajas	Desventajas
Reconstrucción con maquinaria	Rapidez	Mayor coste Morfologías menos naturales Potencial daño al medio
Reconstrucción con captadores	Menor coste Morfologías naturales Sin daño al medio	Lentitud

Tabla 6.3. Ventajas y desventajas de los tipos de reconstrucción topográfica.

Captadores pasivos de arena

Los sistemas pasivos de captación de arenas son estructuras que consiguen formar depósitos gracias a la intercepción de la arena que el viento transporta, al reducir su velocidad por la fricción que ejercen. Estos sistemas son utilizados para 1) ayudar a rellenar huecos o brechas en las dunas, 2) crear cordones completamente nuevos y 3) crear "cordones de sacrificio" para protección de zonas interiores de elevado valor cultural o natural para su conservación.

Los captadores de arena sustituyen así la función que, de forma natural, ejerce la vegetación pionera en la construcción de cordones dunares costeros, como ya se explicó en el Capítulo 3.

La ubicación de los captadores sobre el terreno depende del objetivo perseguido y de la dinámica sedimentaria natural del sistema. Por tanto, en tramos costeros con una dinámica sedimentaria estable o progradante, se sitúan sobre lo que correspondería al cordón dunar embrionario o en posición adelantada. Mientras que en tramos costeros regresivos, se sitúan detrás, donde se ubicaría el límite del sistema al cabo de los años.

Balance sedimentario	Construcción del cordón dunar
Progradante	Siguiendo la tendencia natural se debe reconstruir avanzando hacia el mar.
Estable	Se debe reconstruir en el mismo sitio donde se sitúa el cordón dunar preexistente.
Regresivo	Se debe reconstruir avanzando hacia el interior detrás del primer frente dunar.

Tabla 6.4. Posibilidades de reconstrucción del cordón dunar en relación con el balance sedimentario del sector costero.

Los captadores de arena son empalizadas normalmente de ramas muertas de plantas (mimbre, cañas, matorrales, etc.), tablas de madera (tablestacados) u otros materiales (redes de plástico). Los dos primeros tipos son materiales biodegradables y, en el caso de las ramas muertas, aumentan el contenido en materia orgánica del suelo para la vegetación que posteriormente se instale. Su función es reducir la velocidad del viento por fricción y con ello, disminuir la carga de arena transportada, propiciando la acumulación de arena, aumentando la altura y anchura del depósito. Estos sistemas contrarrestan la erosión eólica y aportan una mayor estabilidad al depósito arenoso. La eficiencia en la acumulación de arena y la morfología de las dunas así formadas depende de la porosidad del sistema de captación, la altura, inclinación, velocidad del

viento, características de la arena, distancia entre filas de captadores, número de filas de captadores y características topográficas de la zona donde se colocan (Nordstrom, 2000). En general, los captadores porosos son más efectivos que los sólidos, ya que estos últimos producen depósitos menos estables (Ranwell y Boar, 1986).

El uso de captadores pasivos de arena está ampliamente extendido debido principalmente a su relativo bajo coste, la facilidad de construcción y su eficiencia en la formación de depósitos arenosos.

Existen dos tipos de captadores, de acuerdo con su emplazamiento y los objetivos perseguidos. Por un lado, sistemas de captadores estructurales para las zonas donde no existe vegetación y el cordón dunar está prácticamente ausente, y por otro, sistemas de captadores de apoyo a las plantaciones, para las zonas donde existe algo de vegetación y el cordón dunar mantiene todavía su estructura.

- Sistemas de captadores estructurales

Líneas de captadores cuyo papel principal es la formación de un cordón dunar en zonas donde éste ha desaparecido o se quiere construir uno nuevo. Están constituidos por bandas de un número variable de filas continuas de empalizadas, clavadas verticalmente en el suelo y paralelas entre ellas. La distancia entre las filas es menor en la zona central con el objeto de conseguir mayor deposición de arena en esa zona y obtener un perfil similar al que presentan los cordones dunares en estado natural. Además, las filas deben colocarse perpendiculares a los vientos dominantes para obtener una mayor eficiencia en la captación de arena.



Foto 6.4. Captadores estructurales.

- Sistemas de captadores de apoyo

Los sistemas de captadores de apoyo se utilizan en zonas donde el cordón dunar no está totalmente degradado y se instalan entre la vegetación natural o entre las plantaciones. Su principal objetivo es la protección de las plantaciones frente a la erosión eólica y la deposición de arena mientras las plantas alcanzan su tamaño adulto, asumiendo posteriormente éstas la función de estabilización y fijación de las zonas de arena móvil. Este tipo de captadores se puede utilizar también en las mismas zonas donde se han instalado los captadores estructurales, pero en una fase posterior, una vez



Foto 6.5. Captadores de apoyo.



Foto 6.6. Efecto de los captadores.

que el nivel de arena adquiera una elevación suficiente. Se suelen disponer en filas discontinuas al tresbolillo, es decir, cuando el vacío entre dos captadores coincide con el captador de la fila siguiente. El proceso de instalación y la disposición en el terreno es el mismo que en el caso de los captadores estructurales.

El emplazamiento del captador es determinante del perfil dunar que se pretende construir. Cuando los captadores se sitúan paralelamente al pie de la duna, se recoge directamente la arena seca que procede de la playa, aumentando el volumen de la duna embrionaria. Si los captadores se sitúan en la cresta de la duna, lo que aumenta es la altura del cordón dunar. Existen también captadores que se sitúan perpendicularmente a los paralelos a la línea de costa y que son frecuentes en algunos países de Europa. Sin embargo, éstos, al igual que los anteriores, requieren un cuidadoso emplazamiento, pues pueden provocar erosión en otras zonas. Además, el perfil que se consigue es menos aerodinámico, originando turbulencias en el viento y consecuentemente, potenciales efectos erosivos.



Foto 6.7. Instalación de los captadores. Distribución sobre el terreno.

Con captadores flexibles, como los formados por varas de mimbre, la sedimentación tiene lugar a sotavento de las filas de captadores y en una anchura de ocho veces su altura, por lo cual, la distancia entre las filas debe ser aproximadamente de ocho metros. En el caso de las tablestacas, la sedimentación de arena ocurre tanto a barlovento como a sotavento y la acumulación es mucho más irregular que en los captadores flexibles, por lo que su funcionamiento y utilización no es similar a la de éstos.



Foto 6.8. Instalación de los captadores. Apertura de zanja y colocación.

En general, los captadores flexibles producen una acumulación más homogénea y tendida, consiguiendo una topografía mucho más aerodinámica y estable que en el caso de las tablestacas. Además, la vegetación coloniza mucho mejor las arenas estabilizadas con captadores flexibles que con tablestacas, debido a que estabilizan la superficie reduciendo la erosión por el viento.

Las tablestacas, sin embargo, son más útiles para la formación de depósitos provisionales en la playa seca y para evitar la llegada del mar en mareas vivas. Posteriormente, al retirarse, estos depósitos son transportados por el viento hacia la duna propiamente dicha.

Los captadores flexibles de mimbre son usados ampliamente en España por su relativo bajo coste, fácil adquisición y sencillo montaje. Sus efectos han sido contrastados en numerosos trabajos de restauración, en especial en las dunas de las costas cantábricas y atlánticas. Comercialmente, se encuentran desde 100 hasta 180 cm de altura. Se entierran un tercio de su longitud y la densidad más comúnmente empleada es de 3 kilogramos por metro lineal. En las costas mediterráneas, se suelen emplear captadores realizados con la planta *Spartina* (borró), armada y tejida con cañas. Este material es fácilmente recolectable en zonas húmedas y se construyen de forma artesanal en segmentos de 1 a 2 m de longitud. Su altura es inferior a 60 cm y se entierran unos 20 cm. Su eficacia ha sido ampliamente reconocida en ambientes de escaso transporte de arena por el viento.



Foto 6.9. Efecto de las tablestacas.

Cuando los captadores de arena pierden su función al ser sepultados por éstas, es el momento de colocar encima del depósito otra línea de captadores si se desea seguir aumentando el tamaño de la duna o bien proceder a su estabilización mediante la plantación de la vegetación dunar.

Tabla 6.5. Captadores de mimbre

Descripción

Ramas de mimbre seco, hincadas verticalmente en el suelo, de una longitud media de 1,80 m, de los cuales 0,60 m van enterrados, quedando, por tanto, a una altura con respecto al suelo, de 1,20 m. Se disponen en filas paralelas entre ellas y separadas entre sí unos 8 metros.

Se excava una zanja de 0,6 m de profundidad y una anchura de 0,4 a 0,6 m, en función de la cohesión de la arena, para evitar que los derrumbes laterales de la zanja tapen la excavación. Esta zanja se podrá efectuar mediante maquinaria (zanjadora, retroexcavadora, etc.), o por medios manuales.

Los captadores se colocan en fila dentro de la zanja con una densidad de mimbre de 3 Kg/m. Se tapa la zanja manteniendo las varas de mimbre en posición vertical. Por último, se apisona la zona rellenada para dar más estabilidad a la empalizada.

Ventajas	Inconvenientes
• Al ser porosos son más efectivos que los sólidos, ya que estos últimos producen depósitos menos estables. • Estabilizan la superficie ayudando a la colonización natural. • Su instalación es más sencilla. • Su precio es menor que las tablestacas. • Son biodegradables, aumentando el contenido en materia orgánica del suelo.	• Tienen un impacto paisajístico considerable. • Son menos resistentes a fuertes inclemencias climáticas (lluvia y viento). • Son más endebles y menos resistentes en el tiempo que los de madera.

Foto





Esquema

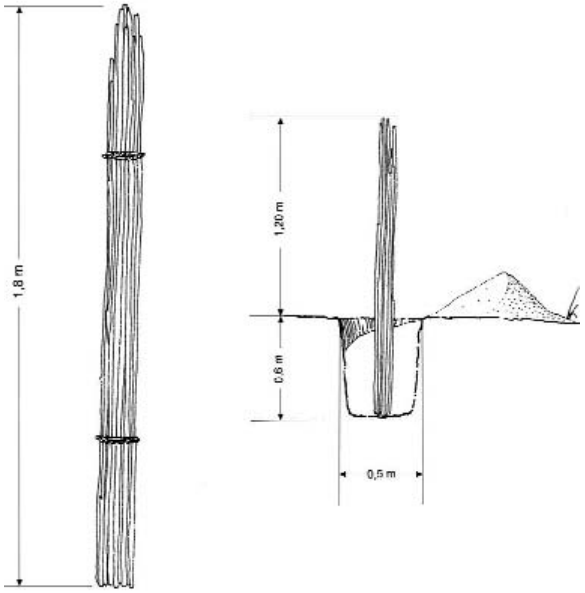


Tabla 6.6. Captadores de espartina

Descripción

Utilizados sobre todo en la costa Mediterránea, están construidos con borró (*Spartina versicolor*) y armados con cañas, que se hincan verticalmente en el suelo, formando una densa empalizada. Suelen disponerse en una trama ortogonal, en la que se mantiene una separación longitudinal entre las empalizadas de 4 veces la altura de la misma.

Permiten una permeabilidad al viento de un 40-50 % y tienen una altura variable entre 50 y 80 cm. Con el tiempo, las empalizadas se cubren de arena (2º-3º año), se pudren (4º-5º año) y desaparecen, alcanzando la duna un aspecto totalmente natural a partir del 6º-7º año.

En la zona de sotavento, las empalizadas tardan más en degradarse y desaparecer por la menor movilidad de la arena en este sector.

Ventajas	Inconvenientes
• Al ser porosos, son más efectivos que los sólidos ya que estos últimos producen depósitos menos estables. • Su instalación es sencilla. • Su precio es menor que el de los captadores de madera. • Son biodegradables, aumentando el contenido en materia orgánica del suelo para la vegetación que posteriormente se instale.	• Tienen un impacto paisajístico considerable. • Son menos resistentes a fuertes inclemencias climáticas (lluvia y viento). • El depósito de arena es muy irregular creándose un cordón dunar compuesto de montículos que tarda más en adquirir un perfil uniforme. • Son más endebles y menos resistentes en el tiempo que los de madera.

Foto





Esquema



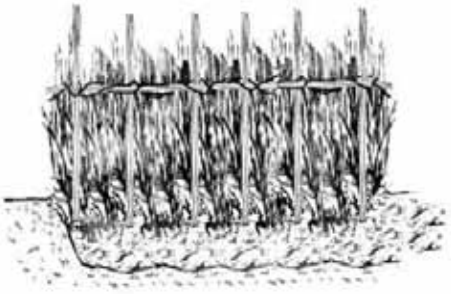


Tabla 6.7. Tablaestacas de madera

Descripción

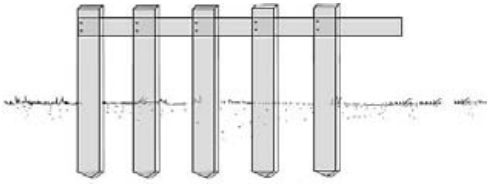
Están constituidos por listones de madera planos verticales unidos mediante listones de madera horizontales más estrechos. En su parte inferior, se insertan en el substrato de forma que la estructura quede bien anclada.

Los tablones verticales van separados unos 25 cm. entre sí y su altura es de 1,2 metros, con uno o dos tablones horizontales.

Se excava una zanja de 0,6 m de profundidad y una anchura de 0,4 a 0,6 m, en función de la cohesión de la arena, para evitar que los derrumbes laterales de la zanja tapen la excavación.

Se tapa la zanja manteniendo las maderas en posición vertical y se apisona la zona rellenada para dar más estabilidad a la empalizada.

Ventajas	Inconvenientes
• Son más útiles para la formación de depósitos provisionales en la playa seca. • Son biodegradables, pero necesitan mucho más tiempo para degradarse que el mimbre. • La deposición de arena ocurre tanto a barlovento como a sotavento.	• La vegetación coloniza mucho mejor las arenas estabilizadas con captadores que con tablestacas. • La acumulación es mucho más irregular que en los captadores flexibles de mimbre. • Pueden romperse y astillarse y ser peligrosos para los usuarios de las playas. • Tienen un impacto paisajístico mayor que el mimbre.

Foto	Esquema
 	 

6.3

Revegetación

Una vez estabilizado el cordón dunar, se procede a su fijación mediante plantaciones de especies dunares que, en estado natural, son las responsables de la formación y mantenimiento de las dunas. Esta actuación tiene por objeto devolver al sistema la cubierta vegetal que, por diversos motivos, ha desaparecido en ciertas zonas. Esta pérdida de cobertura vegetal en el cordón dunar es una de las causas de su desestabilización y de las movilizaciones de grandes volúmenes de arena hacia el interior.

La colonización natural del cordón dunar reconstruido artificialmente es un proceso lento. Si bien la duna costera es un sistema abierto y es continua la llegada de propágulos de tramos dunares cercanos, las dunas restauradas se erosionan antes de que la vegetación se instale y ejerza la función de estabilización. Por lo tanto, la revegetación debe realizarse de forma artificial plantando especies dunares.

6.3.1 Elección de las especies

Los cordones dunares costeros poseen una biodiversidad relativamente baja. García Mora (2000) registró en un muestreo de 55 parcelas de 250 m^2 realizado en 300 km de la costa del Golfo de Cádiz un total de 55 especies vasculares pertenecientes a 49 géneros y 22 familias. Siendo la riqueza específica muy heterogénea, entre 3 y 25 especies por parcela.

Si bien el objetivo de la restauración ecológica es el de devolver a un ecosistema degradado los elementos necesarios para conseguir un equilibrio dinámico similar al natural, no es viable económica ni técnicamente plantear un proyecto de restauración de la cobertura vegetal contemplando la reintroducción de todas las especies que, en teoría, podrían componer el sistema. Por ello, es preciso seleccionar un número limitado de especies a introducir. Aunque todas ejercen su función dentro de este teórico equilibrio dinámico, existen especies clave que ejercen un papel fundamental sobre la dinámica eólica de un cordón dunar mientras que para otras, este papel constructor es mucho menor.

En las dunas costeras activas, las especies de plantas que tienen una función más relevante son aquellas que consiguen una acumulación y estabilización apropiada de los depósitos de arena

y que conforman y mantienen las características geomorfológicas del sistema en una situación de equilibrio dinámico. En las costas europeas y, en concreto, en las de la Península Ibérica, aparecen dos especies especialmente interesantes, la grama marina (*Elymus farctus*) y el barrón (*Ammophila arenaria*), también llamadas "estructurales" (García Mora, 2000) o constructoras de dunas (Ranwell y Boar, 1986). La primera se desarrolla especialmente en las dunas embrionarias y la segunda, sobre el primer cordón dunar. Ambas especies son gramíneas perennes, con un sistema radicular muy desarrollado, adaptadas a las condiciones ambientales del litoral, capaces de dispersarse a través del viento y del agua de mar y resistentes al enterramiento en la arena.

Estas especies son las más utilizadas en las operaciones de revegetación de los cordones dunares y las que más se cultivan para este uso. Ambas especies, no obstante, sólo pueden ser plantadas en las zonas donde existe un aporte regular de arena, necesario para su establecimiento y desarrollo (Van der Putten y Peters, 1995). En concreto, el barrón no prospera bien en zonas donde el aporte de arena es menor de 30 cm/año.

El barrón es la especie más utilizada en las regiones templadas para la estabilización de la arena (Hobbs *et al.*, 1983; var der Laan *et al.*, 1997). Su plantación se lleva a cabo en algunos países europeos, como Dinamarca, desde la Edad Media. Otras especies también utilizadas fuera de nuestro país son *Ammocalamagrostis baltica* (un híbrido entre *Ammophila arenaria* y *Calamagrostis epigejos*) en Holanda, Alemania y Escandinavia (Nordstrom y Arens, 1998). En las áreas templadas atlánticas de Norte América, se utiliza *Ammophila breviligulata* y *Uniola paniculata* (Knutson, 1978; Nordstrom y Arens, 1998). En Australia es también frecuente el uso de otra planta de la misma familia, *Spinifex longifolius*, para estabilizar depósitos arenosos costeros.



Foto 6.10. Plantación de barrón. Apertura de hoyos.

Debido a que el sistema dunar activo es un sistema abierto y que la mayoría del resto de las especies (constituyen alrededor de un 5% de la cobertura (García Mora, 2000) tienen mecanismos de dispersión adaptados a estos sistemas, se puede prescindir de utilizarlas en la plantación, ya que llegarán por sus propios medios. No obstante, si técnica y económicamente es posible, es aconsejable aumentar la biodiversidad del sistema con otras especies. Actualmente, se suelen utilizar como complemento en las restauraciones de las costas españolas especies como *Eryngium maritimum, Helichrysum stoechas, Pancratium maritimum, Otanthus maritimus* y *Euphorbia paralias*, principalmente. En dunas mediterráneas y del Golfo de Cádiz, también se ha ensayado con éxito con *Cakile maritima, Calystegia soldanella, Crucianella maritima, Lotus creticus, Malcolmia littorea, Medicago marina*, etc.

Una vez realizada la función estabilizadora de estas especies estructurales, en un breve intervalo de tiempo se produce la colonización de otras especies dunares (van der Laan *et al.*, 1997).

Sin embargo, el aumento de la diversidad de especies mediante la revegetación no se debe hacer sin un estudio previo de las características de la vegetación del entorno, ya que no todos los sistemas dunares, ni siquiera todos los tramos de un mismo sistema dunar, son igualmente ricos en especies. Además, diferencias en la disponibilidad sedimentaria y en la estabilidad del substrato imponen diferencias en la distribución de las diferentes especies (García Mora *et al.*, 1999).

Para realizar las plantaciones de *Ammophila arenaria*, tradicionalmente se han utilizado plantas obtenidas del medio natural, y también se ha probado la siembra directa de las semillas en el campo (van der Putten, 1990; van der Putten y Kloosterman, 1991), si bien se requiere cierta estabilidad del substrato arenoso y con fragmentos de rizomas (van der Putten, 1990). No obstante, no todos estos métodos tienen la misma efectividad, pues la siembra es poco viable en la práctica, debido a que la mayor parte de las plántulas mueren antes de llegar a adultas por la sequedad, el enterramiento o la erosión por el viento.

El método de entresaca y trasplante no es conveniente en áreas mediterráneas, ya que la densidad de plantas es comparativamente baja (80% de cobertura de *Ammophila arenaria* en Centroeuropa frente a una media de 40-50% en el Golfo de Cádiz), y por tanto, exige grandes extensiones de zonas dunares para la extracción de plantas sin causar excesivos daños. Por otro lado, la producción de plantas dunares en vivero a partir de semillas es mayor y más rentable.

Una vez obtenidas las plantas en vivero, normalmente de 1 a 2 años de edad, se plantan manualmente, excavando un hoyo de unos 25 cm de profundidad, donde se aloja la planta, procediendo posteriormente a taparla. La planta deberá quedar enterrada unos 10 cm con respecto a su nivel original en el lugar de procedencia.

Una de las condiciones indispensables para el uso de plantas procedentes de vivero es que las semillas utilizadas para la revegetación de una zona deban proceder de la misma área geográfica, para así evitar una homogeneización genética de la especie.



Foto 6.11. Plantación de barrón. Colocación de las plantas.



Foto 6.12. Plantación de barrón al cabo de un año.



Foto 6.13. La misma plantación al cabo de dos años.

6.3.2 Diseño de la plantación

Las especies dunares se distribuyen en franjas paralelas a la costa constituyendo formaciones vegetales propias. Como ya se ha explicado en anteriores capítulos, se clasifican en dunas primarias, secundarias, terciarias, dunas activas, inactivas, fijas, etc. En el diseño de la plantación habrá que tener en cuenta la distribución natural de estas especies. Las plantas deben plantarse en zonas donde existe aporte de arena por el viento o por lo menos suficiente transporte, aunque el aporte no sea perceptible. El substrato debe ser siempre arena eólica limpia, sin materiales finos ni materia orgánica.

Además, la observación de cómo se distribuyen las especies en las zonas cercanas suele ser un elemento importante para determinar el emplazamiento exacto de la vegetación.

Respecto al patrón espacial de plantación, en el centro y norte de Europa ha sido habitual la plantación regular muy densa, ya que el objetivo principal normalmente ha sido la fijación de las dunas para impedir su avance hacia el interior o la estabilización de cordones que eviten el avance del mar. Por otro lado, en estas zonas el clima es mucho más húmedo lo que permite una mayor densidad de plantas.

Se debe evitar un patrón regular de plantación y se debe adecuar la densidad de ésta a las características climáticas de cada región costera. La densidad se debe establecer a partir de un estudio de la densidad de plantas en tramos naturales conservados, Así, en el norte de España, la densidad natural se halla alrededor del 75% y en el Golfo de Cádiz se sitúa alrededor del 45%.

6.3.3 Época de plantación

El momento más adecuado para realizar las plantaciones depende de la situación geográfica en la que se realice. En general, las plantaciones se llevan a cabo durante el otoño y el invierno; se excluyen los períodos muy fríos en las costas cantábrica y gallega. En estas épocas, existe riesgo de perder parte de las plantas debido a las bajas temperaturas y a causa de posibles temporales que puedan ocurrir. Sin embargo, si se planta demasiado tarde, se corre el riesgo de que la nueva planta no desarrolle perfectamente su nuevo sistema radical y no pueda resistir los rigores del verano.

Las mejores épocas para realizar estas plantaciones en las costas cantábricas comprenden los meses de noviembre, diciembre, febrero y marzo. En las costas andaluzas y mediterráneas, el

periodo óptimo de plantación es desde la segunda quincena de noviembre hasta finales de febrero. Estas fechas dependen, lógicamente, de la meteorología predominante y se deben ajustar a las condiciones de ese momento. En aquellos otoños anticipados y húmedos, la plantación se puede adelantar y en los períodos secos, se debe retrasar.

En cuanto a las condiciones meteorológicas en el momento de la plantación, se deben evitar momentos de máxima luminosidad solar (horas centrales del día) y situaciones de viento fuerte. Las mejores condiciones climáticas son las de cielo cubierto con humedad ambiental así como en el suelo, aspecto que por otra parte ayuda mucho en el proceso de apertura de hoyos de plantación al mantener la arena más compacta y reducir el desmoronamiento de las paredes del hoyo.

6.3.4 Cuidados posteriores a la plantación

6.3.4.1 Protección

Debido a la baja cohesión del substrato arenoso, la vegetación dunar es muy sensible al pisoteo. El barrón (*Ammophila arenaria*) presenta unas raíces muy quebradizas, por ello las plantaciones deben ser protegidas contra el pisoteo.

Dado que, los sistemas dunares degradados han sufrido una presión turística demasiado elevada, los proyectos de restauración deben incluir sistemas de protección que se comentan en los apartados siguientes.

6.3.4.2 Riegos

En general, si las plantaciones se realizan dentro de su período óptimo, no es necesario proceder a realizar riegos. No obstante, en los casos en los que se requiera un establecimiento más rápido de las plantaciones o en plantaciones tardías, los riegos aceleran el arraigo y desarrollo de la vegetación.

El substrato dunar es altamente permeable, por lo que la cantidad de agua a administrar debe ser lo suficiente como para que llegue a las raíces pero sin que el agua percole hacia capas más profundas. Por otro lado, la infraestructura necesaria para realizar riegos descarta las actuaciones en zonas extensas, limitándose a zonas puntuales que necesiten un cuidado específico. Es mejor realizar riegos más frecuentes y menos copiosos que en terrenos normales. El sistema de riego más efectivo en dunas es el de aspersión.

6.3.4.3 Abonados

Aunque en la mayor parte de los casos no se considera necesario proceder a fertilizar las plantaciones de vegetación dunar, en determinadas ocasiones puede resultar conveniente, ya que favorece el establecimiento de la vegetación en zonas que necesitan ser rápidamente estabilizadas. Por otro lado, tanto el barrón como la grama marina responden muy bien a la fertilización.

De todas formas, existen dos condicionantes importantes a la hora de fertilizar las plantaciones:

- Debido a que la planta necesita haber desarrollado suficientemente el sistema radicular para poder absorber el fertilizante, no es conveniente abonar las plantaciones antes de un año.
- Dado que el substrato arenoso es altamente permeable, durante los meses de lluvia se produce un lavado y pérdida del fertilizante hacia el subsuelo.

Para resolver este problema, se recurre a la utilización de fertilizantes de liberación lenta.

En cuanto a la formulación, el elemento más importante para la nutrición de la vegetación dunar y en especial, de las gramíneas, es el nitrógeno, que constituye un factor de crecimiento para dichas plantas.

El fósforo también puede cumplir un importante papel nutricional en el caso de arenas pobres en dicho elemento, como las provenientes de litologías silíceas.

En cuanto al potasio, en general, no es un elemento carente en los substratos arenosos costeros por el aporte procedente del mar.

Por tanto, se recomienda la aplicación de fertilizantes de liberación lenta con una elevada proporción de nitrógeno.

Entre los más útiles para las zonas dunares está el "Osmocote pro 18-9-10 + microelementos" con un período de liberación de hasta 14 meses. Su aplicación deberá realizarse a principios de la primavera al cabo de un año de haberse realizado la plantación.

Las dosis recomendadas son algo menores de las aconsejadas para suelos normales (no arenosos) y oscilan entre 500 y 1.000 Kg/ha.

Los fertilizantes convencionales (de liberación rápida) deben administrarse en varias dosis fuera de las estaciones muy lluviosas. Lo ideal es tres o cuatro veces al año, preferentemente desde principios de primavera hasta finales del otoño.

Cuadro 6.1. Fertilizantes de liberación lenta

El término "liberación lenta" se utiliza para fertilizantes que no liberan todos los nutrientes disponibles en el momento de su aplicación. La liberación de los nutrientes es variable según el producto y depende de los niveles de humedad del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiológica. Básicamente existen dos tipos, los de nitrógeno de solubilidad lenta y los recubiertos.

El objetivo final de los FLL es liberar nutrientes al mismo ritmo que los demande de la planta y de esa forma, evitar pérdidas. Esto conlleva una mejor eficiencia en su utilización al optimizar la calidad de la planta, disminuyendo la frecuencia en la fertilización y las pérdidas por lixiviación.

PRODUCTOS A BASE DE NITRÓGENO DE BAJA SOLUBILIDAD

Se elaboran mediante reacciones químicas de un componente nitrogenado soluble en agua y aldehídos y consisten en una estructura molecular compleja de baja solubilidad. Una vez aplicados en el terreno se liberan y se transforman lentamente en formas químicas disponibles para la planta.

Urea-formaldehído. La "Urea-formol" es uno de los fertilizantes que se obtienen de la reacción de urea y formaldehído. Estos productos están compuestos por polímeros de monometilol-urea de diverso tamaño y solubilidad. Los compuestos de mayor tamaño son menos solubles que los de menor tamaño, por lo que el tiempo de liberación es más largo. Urea-formol es la menos soluble y contiene al menos un 35% de N total, del cual al menos un 15% es urea no reactiva. Urea-formol es un sólido blanco, que carece de olor y su descomposición está regulada principalmente por la actividad microbiológica en el suelo. Por lo tanto, la liberación de nutrientes dependerá de factores ambientales que regulan la actividad microbiológica en el suelo (temperatura del suelo, humedad, pH y aireación).

Se comercializan con las marcas "Agriform" y "Nitroform". Las formas más solubles de ureas metilenizadas se pueden encontrar con las marcas "Scotts" y "Nutralene".

Isobutilidendiurea (IBDU). Como la urea-formol, se consigue a partir de la reacción de urea y aldehídos y tiene una solubilidad en agua menor a un 0,1%, y cerca de un 30% de N. La IBDU es un sólido blanco y cristalino. A diferencia de la urea-formol, el N en los compuestos IBDU se libera a través de hidrólisis. La tasa de liberación del nutriente depende del tamaño de los gránulos de IBDU y el contenido de agua en el suelo. Este proceso de liberación se puede acelerar en condiciones de acidez y altas temperaturas.

PRODUCTOS RECUBIERTOS

A diferencia de los productos nitrogenados de baja solubilidad, los fertilizantes recubiertos permiten la liberación controlada de otros nutrientes además del N. Los FLL recubiertos consisten en un concentrado de nutrientes soluble recubierto por una capa insoluble al agua. Los materiales para recubrir los fertilizantes incluyen ceras, aceites, azufre, plásticos y resinas. Las más comunes son las cubiertas polimeradas. El grosor de la cubierta determina su tasa de liberación; cuanto más gruesa, más lenta.

Urea recubierta con azufre. Fueron los primeros fertilizantes de liberación lenta. Estos fertilizantes liberan nutrientes por medio de la disolución de la urea en el agua que atraviesa la cubierta.

Fertilizantes recubiertos con polímeros. Son los de mayor avance tecnológico debido a su alta eficiencia en el control de la liberación de nutrientes y la duración del producto, por lo que han reemplazado a los productos recubiertos con azufre. La liberación de nutrientes depende tanto del grosor y composición de la cubierta como de las características del substrato.

El período de liberación de estos fertilizantes oscila entre 3 y 18 meses en condiciones controladas de temperatura en laboratorio (aprox. 21°C), aunque la liberación real en condiciones naturales varía mucho en función del tipo de fertilizante. La mayoría libera una mayor cantidad inmediatamente después de su aplicación. El resto se libera en función del tiempo, temperatura y la humedad del suelo. El mecanismo de liberación ocurre en dos etapas. En la primera, el vapor se infiltra en los gránulos y se condensa en las sales de fertilizante soluble, aumentando la presión osmótica dentro del gránulo. En una segunda etapa, la presión dentro del fertilizante origina el escape de la solución hacia el suelo. A medida que la solución en el gránulo disminuye, la liberación de fertilizantes también disminuye.

La liberación de los productos recubiertos aumenta con la abrasión de la cubierta y por almacenaje. Los gránulos de fertilizantes almacenados son susceptibles de la acción de la humedad, temperatura y de la propia manipulación. Los fertilizantes almacenados, especialmente en contenedores abiertos, pueden comenzar a hidratarse y liberan nutrientes rápidamente inmediatamente después de su aplicación.

Nutricote. La cubierta es una resina termoplástica altamente impermeable. En este caso, se incorporan agentes de control de liberación como el etileno-vinil acetato y diversos surfactantes. La cantidad presente en la cubierta del fertilizante determinará la tasa de entrega. En este caso, la descarga está controlada principalmente por la temperatura del suelo.

Osmocote. Es uno de los más comúnmente utilizados. Consiste en un fertilizante soluble, cubierto por un copolímero termosensible de diciclopentadieno y un éster-glicerol disuelto en un solvente alifático de hidrocarbono. Se comercializan muchos tipos de "Osmocote", con gran variedad en su composición y velocidad de liberación.

Polyon. Corresponde al grupo de los fertilizantes recubiertos con poliuretano, distribuidos bajo el nombre de Apex. El fertilizante se libera por difusión a una velocidad que depende del grosor del recubrimiento. Este producto presenta varias capas reactivas en las cuales los monómeros son polimerizados a medida que entran en contacto con el substrato. Son los menos reactivos a temperaturas extremas porque el poliuretano se mantiene rígido, intacto y no se expande.

Ventajas

Las ventajas de los fertilizantes de liberación lenta sobre los fertilizantes solubles de liberación rápida son las siguientes:

- Capacidad de suministrar nutrientes a las plantas durante períodos de tiempo prolongados en sólo una aplicación, por lo que su eficacia es mayor.
- Debido a su lenta descarga, las posibilidades de daños a las plantas causados por elevadas concentraciones de nutrientes se reducen.
- Disminución de las pérdidas de nutrientes por lixiviación.
- Aunque los FLL son más caros que los fertilizantes solubles en agua, la mayor frecuencia de aplicaciones requeridas hace que, a la larga, sean más costosas.

Desventajas

La principal desventaja de los fertilizantes de liberación lenta consiste en la posibilidad de que se produzca una liberación de nutrientes descontrolada de manera accidental. A diferencia de los fertilizantes convencionales, los FLL no pueden ser ajustados una vez aplicados, incrementando las pérdidas por lixiviación.

6.4 Eliminación de la vegetación invasora

La eliminación de la vegetación invasora es un aspecto fundamental en la restauración de los ecosistemas dunares costeros. Su erradicación ha de ser completa, ya que si se dejan restos de vegetación o semillas, al cabo de poco tiempo, volverán a expandirse sobre el sistema dunar, haciendo inútiles los esfuerzos de eliminación realizados.

Las campañas de eliminación deben ser prolongadas en el tiempo siendo aconsejable que, después de la primera eliminación, se realicen nuevas campañas anuales o bianuales durante al menos cinco años, para garantizar la desaparición total de las plantas y semillas.

La eliminación de la vegetación invasora puede llevarse a cabo mediante métodos físicos, como el arranque directo o mediante la aplicación de herbicidas. El primer método sólo es conveniente en el caso de superficies colonizadas lo suficientemente pequeñas como para asegurar la eliminación de la totalidad de la planta. La aplicación de herbicidas se considera lo más adecuado para los sistemas dunares, siempre que se apliquen correctamente. Exigen menor coste y son más eficaces puesto que se translocan a la totalidad de la planta evitando rebrotes. Además, la eliminación física frecuentemente aumenta los procesos erosivos en la duna.

Los herbicidas más utilizados para la eliminación de especies invasoras son los que tienen como sustancia activa el "Glifosato", ya que además de su gran eficacia dentro de los herbicidas no hormonales, son los que presentan menor toxicidad tanto para el hombre como para la fauna terrestre y acuática y no son corrosivos ni inflamables.

Para lograr su máxima efectividad, la aplicación debe realizarse cuando la planta comienza su actividad en primavera (desde mediados de febrero hasta mediados de mayo en las costas andaluzas y desde marzo a junio en las costas cantábricas). La aplicación se realiza por microaspersión, procurando mojar toda la planta y evitando la vegetación autóctona. La dosis recomenda es de 160 ml de sustancia activa en una superficie de unos 100 m^2.

En cualquier caso, para reducir los riesgos de las plantas invasoras es imprescindible evitar la plantación de especies no autóctonas de un sistema dunar concreto.

6.5

Sistemas de protección

Una de las causas más importantes de la degradación y desaparición de la cubierta vegetal es el pisoteo de los usuarios de la playa sobre la vegetación. La afluencia masiva, especialmente durante los meses de verano a las costas, origina la pérdida de la vegetación, sobre todo en las zonas próximas a los aparcamientos, chiringuitos, etc.

Para lograr una restauración exitosa es indispensable eliminar la afluencia de público al área donde se realiza la actuación. Para ello, es necesario realizar una serie de obras para proteger el cordón dunar, dentro de las que se incluyen cerramientos, adecuación de accesos, construcción de pasarelas y carteles informativos.

6.5.1 Cerramientos

Para proteger las zonas plantadas y las zonas que, aunque no hayan sido objeto de plantación, necesitan limitar la afluencia de visitantes, se considera necesaria la instalación de un cerramiento.

Existen muchos tipos de cerramiento para proteger los cordones dunares en función de la presión de visitantes que soporta y de la estética que se pretenda conseguir, pero los más efectivos son los que evitan el paso de al menos el 90% de los usuarios que entraban antes de cerrar el paso.

Los tipos de cerramientos más comúnmente empleados se detallan a continuación:

Tabla 6.8. Cerramiento de madera y malla metálica

Descripción

De tipo rústico, formado por postes de madera tratada separados 2 m entre ellos y unidos mediante una malla metálica.

Ubicación	Disposición	Materiales	Tipo de malla	Tipo de poste
Incrustado en el terreno.	En el perímetro de la zona de actuación.	**Postes de madera** de 2,50 m. de alto 10 cm. de diámetro. Enterrados hasta una profundidad de 1 m. Altura sobre el nivel del terreno de 1,5 m. **Malla metálica** de alambre galvanizado, reforzado triple de 1,5 m de altura, fijada a los postes verticales con grapas metálicas separadas unos 30 cm.	Simple torsión galvanizada. Simple torsión plastificada verde. Triple torsión galvanizada. Ganadera anudada galvanizada. Electrosoldada plastificada verde. Alambre de espino.	Cremallera galvanizado. Cremallera galvanizado plastificado. Cilíndrico de madera. Madera plástica.
Instalación	**Tiempo de vida**			
Necesita maquinaria.	Permanencia en el medio durante mucho tiempo sin biodegradarse.			

Ventajas	Inconvenientes
• Precio (20 € / ml). • No necesita cimentación. • Carácter rural con menor impacto paisajístico. • No son fácilmente franqueables. • Muy efectivos.	• Deterioro y posibilidad de rotura de la malla metálica. • Rotura de la madera, astillas, etc. • Susceptibilidad de ser escalado por la malla y deteriorado por actos vandálicos. • En caso de enterramiento, la malla metálica es muy difícil de extraer de la arena.

Foto



Esquema

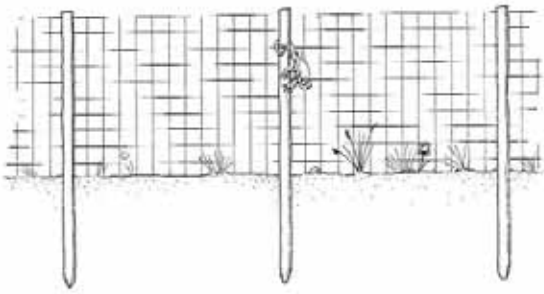


Tabla 6.9. Cerramiento de madera o madera plástica

Descripción

De tipo rústico, formado por rollizos de madera tratada separados 2 m entre ellos y unidos mediante diagonales formadas de rollizos de madera.

Ubicación	Disposición	Materiales	Tipo de poste	Características
Incrustado en el terreno.	En el perímetro de la zona de actuación.	**Postes** de madera de 10 cm. de diámetro, enterrados 1 m, quedando el extremo superior del poste a una altura de 1 m. Con postes cada 2 m. con 1 m. de altura libre y diagonales de poste a poste, y pasamanos, también de madera.	Postes cilíndricos de madera. Postes de madera plástica (Material 100% reciclado que proviene de desechos plásticos).	**Madera:** más biodegradable, menor precio y menos resistente que la de plástico. **Plástico:** Mayor resistencia a la intemperie que la madera, mayor flexibilidad y aguante ante rotura, no le afecta el ambiente salino, no se astilla, no se agrieta, no le afectan los hongos ni las bacterias, poca o nula deformación ante cambios de temperatura, fácil limpieza, no es biodegradable.
Instalación	**Tiempo de vida**			
Necesita maquinaria.	Permanencia en el medio durante mucho tiempo sin biodegradarse.			

Ventajas	Inconvenientes
• No necesita cimentación. • Su carácter rural y su menor altura tiene menos impacto paisajístico. • En caso de enterramiento, es más sencillo de extraer.	• Su menor altura permite franquearlo sin problemas y acceder a las zonas de actuación. • Precio mayor que el vallado con malla metálica (40 € / ml). • Rotura de la madera, astillas, etc. • Susceptibilidad de ser deteriorado por actos vandálicos.

Foto



Esquema

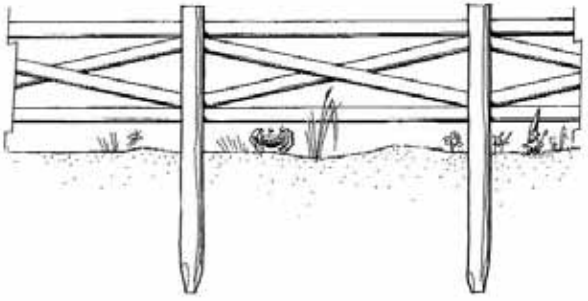


Tabla 6.10. Cerramiento de madera y cuerda

Descripción

De tipo rústico, formados por postes de madera tratada separados 2 m entre ellos y unidos mediante una cuerda.

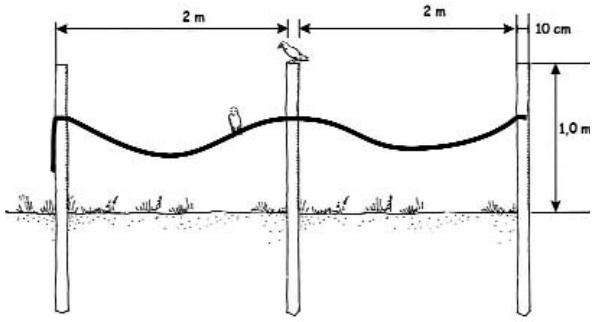
Ubicación	Disposición	Materiales	Tipo de poste	Tipo de cuerda
Incrustado en el terreno.	En el perímetro de la zona de actuación.	**Postes** de madera de 10 cm. de diámetro, separados cada 2 metros, enterrados hasta una profundidad de 1 m, quedando el extremo superior del poste a una altura de 1 m. Cuerda: La cuerda de poste a poste puede ir o bien atada a cada poste o bien se perfora el poste y la cuerda atraviesa el poste.	Postes cilíndricos de madera. Postes de madera plástica (Material 100% reciclado que proviene de desechos plásticos).	Sisal de 18 mm de diámetro. Polipropileno. Cuerda cableada. Cuerda trenzada.
Instalación	**Tiempo de vida**			
No necesita maquinaria.	Permanencia en el medio durante mucho tiempo sin biodegradarse.			

Ventajas	Inconvenientes
• No necesita cimentación. • Su carácter rural y su menor altura tiene menos impacto paisajístico. • En caso de enterramiento, es más sencillo de extraer. • Precio menor que el vallado con malla metálica o sólo de madera (10 € / ml)	• Su menor altura permite franquearlo sin problemas y acceder a las zonas de actuación. • Rotura de la madera, astillas, etc. • Susceptibilidad de ser deteriorado por actos vandálicos.

Foto



Esquema



En zonas de mucho uso, para evitar conflictos con los intereses de los bañistas, es aconsejable evitar el cierre de áreas demasiado extensas dejando pasillos.

El área a proteger es un elemento clave para conseguir una protección efectiva del sistema dunar en su conjunto. Dado que la formación de las dunas tiene lugar desde el lado del mar hacia el interior, es en esta franja más próxima al mar donde la protección debe ser más efectiva. En éste área debería incluirse, siempre que sea posible, además de la zona activa (dunas primarias y secundarias), la zona de la playa seca donde se desarrolla un tipo de vegetación más adaptada a las condiciones impuestas por su cercanía al mar.

Un problema frecuente en los cerramientos y en especial, en los que se realizan en las zonas más móviles (por cercanía al mar o por la inestabilidad del substrato con respecto al viento), es su enterramiento o su descalce. Es muy importante tener en cuenta este problema en los planes de mantenimiento de las áreas dunares restauradas pues, en caso contrario, dejarían de ser eficaces, por el enterramiento del cerramiento en zonas de mucho aporte, o por la caída de tramos en zonas de erosión.

Con respecto al equilibrio sedimentario que presente el sistema, la distancia entre el cerramiento y el cordón dunar es también variable. En zonas de acreción, y en previsión de un avance de la duna hacia el mar, esta distancia debe ser mayor. Mientras que si se trata de zonas erosivas, la distancia puede ser menor y más condicionada, por los problemas que pudiera causar el oleaje.

Muy frecuentemente, los cordones dunares, aunque no presenten un balance sedimentario negativo, están sujetos a cambios a pequeña escala causados por la acción del oleaje por lo que se observan tendencias erosivas y progradantes alternas durante periodos de pocos años. En zonas que han sufrido erosión basal del cordón recientemente por efecto del oleaje, es conveniente prever la readaptación del perfil dunar alejándose de la base de la duna, aunque el riesgo de deterioro por el oleaje directo sea mayor.

6.5.2 Pasarelas

Para evitar el pisoteo es recomendable habilitar pasarelas transversales al cordón dunar que canalicen el paso entre ambos lados del cordón. La morfología de los sistemas dunares suele ser de tipo cordón dunar con una estructura de la vegetación continua. Estos cordones, al estar situados en la zona trasera de la playa, interrumpen el acceso natural de los usuarios a la misma, por lo que es frecuente la aparición de caminos a través del cordón. Como el substrato dunar es muy



Foto 6.14. Pasarela de acceso a la playa.

suelto y no existe apenas vegetación que lo retenga, el viento erosiona estos pasillos y transporta la arena hacia el interior, generando taludes laterales muy inestables en los pasillos. Éstos se van ensanchando por acción del viento y por el pisoteo hasta que el cordón dunar queda fragmentado y reducido a montículos más o menos separados entre sí, que sufren una erosión muy fuerte y que, al final, si este proceso continúa, terminan desapareciendo. Los sistemas más recomendables para evitar estos procesos de degradación consisten en pasarelas de madera, elevadas sobre el suelo y soportadas mediante pilotes, ya que al quedar un espacio suficiente entre la estructura y la duna permiten el establecimiento de la vegetación y no interfieren en el transporte de arena por el viento.

6.5.2.1 Dimensiones

Las dimensiones de las pasarelas vienen determinadas por varios factores. En primer lugar, el carácter de la zona, es decir, si es el correspondiente a una playa urbana o rústica, si es una zona muy urbanizada o no, de los valores paisajísticos y naturales que posea, de la densidad de usuarios que cruzan las pasarelas, de la necesidad de protección del sistema dunar, etc.

En general, dado que en las zonas urbanas los sistemas dunares han desaparecido, los que persisten hoy se sitúan en zonas más o menos naturales, por lo que la afluencia de público no es tan masiva como en playas muy turísticas.

En estos casos, la anchura de la pasarela debe permitir el cruce de dos personas con coche de niños, es decir, entre 1,5 y 2,5 metros.

6.5.2.2 Trazado

El objeto de estas pasarelas es el de impedir o reducir el efecto negativo de las pisadas humanas y de otros animales, especialmente caballos, sobre la vegetación dunar. Por otro lado, al facilitar al usuario cruzar la duna sobre un terreno arenoso e incómodo para caminar, son generalmente bien aceptadas por la sociedad. No obstante, en el diseño del trazado se debe tener en cuenta tanto la protección de la duna como la utilidad para el transeúnte.

Como norma general, las pasarelas de protección suelen conducir a los usuarios desde el interior hasta la playa, cruzando el sistema dunar. Por tanto, deben cubrir toda la anchura de la duna.

Deben ser sobreelevadas para reducir el efecto negativo de las estructuras frente a la dinámica eólica de transporte y para permitir una cobertura vegetal suficiente. Se recomienda una altura mínima de un metro y máxima de dos. Mayores elevaciones implican problemas de diseño y alto impacto visual.

Un error que se suele cometer en el trazado de las pasarelas es el de atravesar el cordón dunar por un pasillo de deflación. Muchas veces se actúa así con el intento de aprovechar un camino existente para dañar lo menos posible la vegetación, pero normalmente los caminos de acceso a playas que atraviesan cordones dunares, originan un pasillo de deflación por el paso de los usuarios, especialmente en el frente (foredune).

En estos casos, en la zona correspondiente a la duna activa, se debe atravesar el cordón dunar por una zona de altura normal, es decir, no por una depresión o pasillo de deflación, pues de otro modo, no se podrá restaurar dicho pasillo.

A continuación, se detallan los tipos de pasarelas más comúnmente utilizados:

Tabla 6.11. Pasarelas llanas de madera sin barandilla

Descripción

Situadas sobre el cordón dunar con un trazado ligeramente sinuoso, están compuestas de tablones de madera tratada, apoyados sobre rastreles del mismo material. Pueden situarse directamente sobre la arena o discurrir sobreelevadas con respecto al suelo mediante pilotes que se entierran en la arena.

En ocasiones, en el último tramo, ya en la playa, se utilizan unas pasarelas especiales enrollables apoyadas directamente sobre la arena (que pueden retirarse al acabar la temporada de baños) y que están realizadas con madera o plástico reciclado, y unidas por cordón.

Ventajas	Inconvenientes
• Su montaje es más sencillo que el resto de las pasarelas. • Su precio es menor que el resto de las pasarelas. • En caso de enterramiento, es más sencillo de extraer. • Su carácter rural y su menor altura tiene menos impacto paisajístico . • Permite su utilización a discapacitados físicos.	• Sólo pueden utilizarse en zonas con una topografía muy suave y sin grandes desniveles, ya que la falta de barandilla puede dar origen a accidentes. • Aunque algunas pueden ir algo sobreelevadas, en general, debajo de ellas carecen de espacio suficiente para permitir el establecimiento de la vegetación e interfieren en el transporte de arenas por el viento. • Escasa reducción del acceso de los viandantes hacia el cordón dunar.

Foto





Esquema

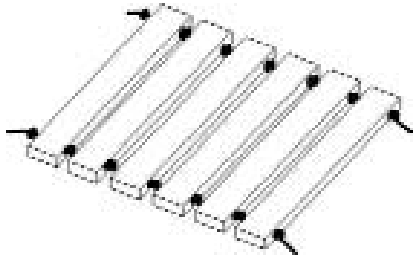


Tabla 6.12. Pasarelas llanas de madera con barandilla

Descripción

Al igual que las pasarelas llanas sin barandilla, están situadas sobre el cordón dunar con un trazado ligeramente sinuoso, compuestas de tablones de madera tratada y apoyados sobre rastreles del mismo material.

Sobreelevadas con respecto al suelo mediante pilotes de madera que se entierran en la arena, están provistas de barandillas a ambos lados, y se accede a ellas mediante tramos en rampa o en escalera en función de la topografía concreta de la zona. En ocasiones, se instalan miradores o lugares de descanso techados utilizando el mismo material.

Ventajas	Inconvenientes
• Pueden utilizarse en zonas con una topografía más irregular y con cierto desnivel ya que la barandilla evita accidentes. • Su montaje es más sencillo y su precio menor que el de las pasarelas en escalera. • Su carácter rural tiene menor impacto paisajístico. • Las barandillas reducen la salida de los viandantes hacia el cordón dunar. • Al estar algo sobreelevadas, en general, debajo de ellas existe el espacio suficiente para permitir el establecimiento de la vegetación y no interfieren en el transporte de arenas por el viento.	• Su precio es mayor que el de las pasarelas sin barandilla. • En caso de enterramiento, es más difícil de extraer. • Su mayor altura tiene mayor impacto paisajístico . • Su montaje es más complejo y su precio mayor que el de las pasarelas sin barandilla. • No siempre es accesible a discapacitados físicos.

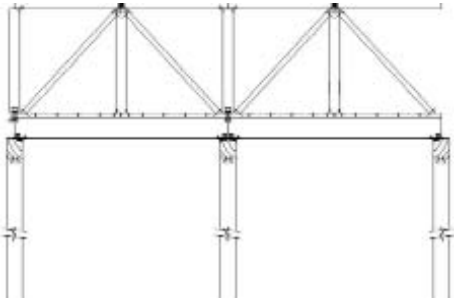
Foto	Esquema
 	

Tabla 6.13. Pasarelas de madera en escalera con barandilla

Descripción

Cuando la topografía dunar no permite instalar una pasarela inclinada porque la pendiente es muy elevada, entonces se recurre a instalar tramos en escalera. En todos los casos están provistas de barandillas a ambos lados.

Ventajas	Inconvenientes
• Pueden utilizarse en zonas con una topografía más irregular y con mayor desnivel . • Su carácter rural tiene menor impacto paisajístico. • Las barandillas reducen la salida de los viandantes hacia el cordón dunar.	• En caso de enterramiento, es más difícil de extraer. • Su mayor altura tiene mayor impacto paisajístico. • Su montaje es más complejo y su precio mayor que el de las otras pasarelas. • Aunque algunas pueden ir algo sobreelevadas, en general, debajo de ellas no existe el espacio suficiente para permitir el establecimiento de la vegetación e interfieren en el transporte de arenas por el viento. • Es infranqueable para los discapacitados físicos.

Foto	Esquema
 	

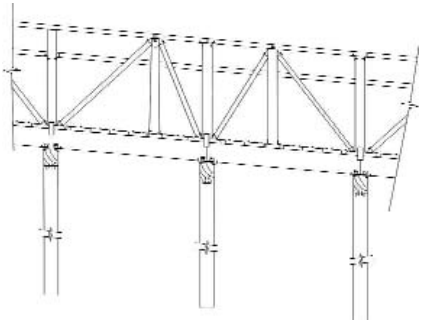
Tabla 6.14. Pasarelas de madera adaptadas a discapacitados físicos

Descripción

Condiciones de diseño que recoge el Plan de Accesibilidad a las playas españolas, de mayo de 2001:

- Pendiente menor del 8 % y sin tramos inclinados de longitud superior a 10 m sin meseta intermedia.
- Ausencia de tramos en escalera que siempre serán sustituidas por rampas. La directriz de la rampa será recta o ligeramente curva, con radio mayor o igual a 50 m.
- Ancho libre de las rampas de 1,20 m. En las zonas de acceso a las rampas, así como en las mesetas o descansillos intermedios, se podrá inscribir un círculo libre de obstáculos de 1,50 m de diámetro.
- Provistas de un doble pasamanos a ambos lados, preferentemente de sección circular formada por un rollizo de madera de 5 cm de diámetro, localizado a una altura de 70 cm.

Ventajas	Inconvenientes
• Pueden utilizarse en las zonas con una topografía más irregular y con mayor desnivel . • Su carácter rural tiene menor impacto paisajístico . • Las barandillas reducen la salida de los viandantes hacia el cordón dunar. • Al estar algo sobreelevadas, en general, debajo de ellas existe espacio suficiente para permitir el establecimiento de la vegetación y no interfieren en el transporte de arenas por el viento.	• En caso de enterramiento, es más difícil de extraer. • Su mayor altura tiene mayor impacto paisajístico. • Su montaje es más complejo y su precio mayor que el de las otras pasarelas.

Foto	Esquema
 	

6.5.3 Carteles y sistemas de comunicación

Un aspecto fundamental en las obras de restauración dunar es la actitud de los ciudadanos ante las mismas, pues si no son comprendidas y aceptadas por los usuarios, a la larga, la falta de cuidados y el vandalismo terminan por hacer fracasar la actuación. Por lo tanto, en este tipo de actuaciones, se considera muy importante informar a los usuarios acerca de las características y la problemática del ecosistema dunar y de las inversiones que se están realizando para regenerar el mismo. De esta manera, se hace partícipe al ciudadano y se consigue su colaboración para el cuidado de este tipo de obras.



Foto 6.15. Cartel explicativo de los procesos de degradación.



Foto 6.16. Cartel explicativo de la flora dunar.

6.5.4 Otras técnicas

Además de la utilización de captadores, existen otras técnicas tales como recubrimientos y mulches. A continuación, se describe brevemente en qué consiste cada uno de ellos.

Los **recubrimientos** suelen realizarse con materiales de diverso origen, orgánico o inorgánico, tales como paja, restos de poda, plástico biodegradable, etc. con el objeto de reducir la erosión del viento sobre las zonas recién restauradas. Esta técnica resulta de gran utilidad en las prime-

ras fases de establecimiento de la vegetación por su efecto protector frente al viento. En el caso de los recubrimientos orgánicos, con el paso del tiempo estos materiales se degradan incorporándose al sistema en forma de nutrientes.

Se utilizan especialmente en áreas extensas y muy móviles, como por ejemplo, en las zonas donde la vegetación no se ha desarrollado lo suficiente como para estabilizar el sistema. A diferencia de los captadores, que también tienen un efecto protector, no atrapan tanta arena, por lo que la topografía apenas cambia y no se entierran las plantaciones.

Son frecuentes en el suroeste de Francia, en la zona de Las Landas, donde se han llevado a cabo numerosos trabajos de restauración dunar y consisten, básicamente, en colocar sobre la arena tallos de arbustos de tipo retama que protegen la superficie y quedan muy planos. Bajo estos recubrimientos, las condiciones microclimáticas son más suaves y la colonización vegetal y el establecimiento de las plantaciones se ve mejorado.

Aunque estas técnicas no están muy desarrolladas en España, son aplicables a la mayoría de las zonas a restaurar y en especial, a zonas con fuertes vientos como en el sur de Cádiz o Galicia.

El "**mulch**" es un tipo de recubrimiento protector que se extiende sobre una superficie y que consigue mantener mejor la humedad, regular la temperatura, reducir la erosión eólica y mejorar las características nutricionales del substrato.

Existen muchos tipos de mulch, inorgánicos y orgánicos, que son muy utilizados en jardinería tradicional. En el caso de las restauraciones de sistemas dunares, son poco utilizados entre otras razones, por su elevado precio, por alterar las características del substrato arenoso y por limitar la capacidad de colonización de las especies naturales, por lo que su uso queda restringido a zonas muy puntuales sin vegetación natural, como playas urbanas con problemas erosivos que impiden la regeneración natural y el establecimiento de las plantaciones.

6.6 Seguimiento de las obras de restauración

En las obras de restauración dunar, los efectos no se manifiestan inmediatamente, cosa que ocurre en la mayor parte de las obras de construcción, sino que se necesita un cierto tiempo para que los captadores actúen, se establezca la vegetación y los elementos naturales se autorregeneren gracias a las medidas de protección realizadas.

Por otro lado, no existe una experiencia sistematizada ya que depende de muchas variables, entre otras, la gran variedad de los sistemas dunares, el clima, características de la dinámica sedimentaria y eólica, etc.

La utilización de sistemas pasivos, como los captadores de arena, producen una respuesta no siempre igual en los ecosistemas dunares restaurados, pues depende del régimen de vientos y de otros factores, como la humedad de la arena o la superficie de playa seca erosionable.

Además, la utilización de seres vivos y el objetivo mismo de la restauración, que es ayudar al sistema a recuperar los procesos físicos y ecológicos, implica muchas interacciones con las variables físicas, las cuales producen diferentes respuestas en cada caso determinado.

Estas particularidades introducen en la sistemática de la restauración dunar un componente elástico que es necesario abordar para perfeccionar y optimizar las técnicas. Para ello, es útil la realización de seguimientos desde el comienzo de las obras o incluso antes, durante el replanteo del estado del sistema dunar en el momento de la actuación hasta varios años después de terminada la obra.

6.6.1 Seguimiento en la etapa preoperacional

La función básica del seguimiento en esta etapa consiste en establecer un procedimiento que garantice la correcta ejecución y cumplimiento de las actuaciones que se describen en el proyecto adaptado a la situación de la zona a regenerar en el momento.

En la etapa preoperacional se incluye el reconocimiento del terreno para comprobar el estado actual y los cambios que haya podido sufrir, así como un replanteo de las actuaciones proyectadas para comprobar su conveniencia y oportunidad. Dados los condicionantes climáticos y administrativos que concurren en las obras de restauración ecológica, es conveniente revisar el plan de actuación y optimizar su calendario.

En general, los aspectos de las obras de restauración más importantes son los siguientes:

Efecto de los captadores de arena

En la mayor parte de la costa española se deben realizar a principios de otoño, antes de los temporales equinocciales, para que cuando se realicen las plantaciones exista ya un cúmulo de arena.

Plantaciones

La época apropiada para realizar las plantaciones está comprendida entre mediados de octubre y mediados de marzo, excluyendo los momentos muy fríos (normalmente entre mediados de diciembre y mediados de febrero). Esto implica que existen dos meses en otoño y un mes a finales del invierno, en los cuales se puede plantar.

Cerramientos

La protección mediante cerramientos debe realizarse simultáneamente a la plantación, pues es imprescindible preservarlos de la afluencia masiva de visitantes.

6.6.2 Seguimiento durante las obras

Los seguimientos o controles desarrollados durante la fase de obras tienen por objeto ayudar en la adecuada ejecución de las actuaciones definidas en el proyecto, así como asesorar sobre posibles cambios en las mismas, especialmente aquellos que impliquen incidencias en las plantaciones de especies vegetales (variación de las mediciones, modificaciones en el diseño, etc.).

A este respecto, con objeto de garantizar el cumplimiento de esta vigilancia y establecer el control de calidad, la vigilancia ambiental deberá operar a pie de obra, realizar mediciones sobre las actuaciones que se realicen y mantener contacto con el contratista y la dirección de obra durante el transcurso de la misma.

El seguimiento en esta fase debe incluir todas las unidades de obra a ejecutar. Se desarrolla mediante visitas periódicas en las que se evalúan las actividades realizadas y se planifican las nuevas actuaciones a acometer. Además, incluye un asesoramiento en los aspectos que se necesiten de cara a optimizar los trabajos y conseguir una ejecución del proyecto de la manera más eficaz posible. Se debe orientar además sobre otros aspectos, como lugares de aprovisionamiento de los materiales, ubicación de la maquinaria y elementos auxiliares, etc. y sobre problemas o situaciones nuevos, no contemplados en el proyecto.

6.6.3 Seguimiento posterior a la obra

El seguimiento durante la etapa posterior a la realización de las obras de restauración de los sistemas dunares es un aspecto muchas veces infravalorado pero fundamental para compren-

der los procesos y mejorar las técnicas, pues permite una visión objetiva y crítica de los objetivos establecidos y de los resultados obtenidos en las actuaciones realizadas.

Los aspectos más importantes a monitorizar deben incluir la evolución general del sistema, el perfil dunar, el establecimiento, desarrollo y capacidad fijadora de la nueva vegetación establecida, la colonización de especies dunares, la aparición de especies invasoras, la eficacia de las medidas protectoras, los cambios que pudieran ocurrir por causas naturales o antrópicas, etc.

Para obtener la mayor información, la duración de los seguimientos posteriores a las obras debe ser, al menos, de tres años intensivos, dos años más periódicos y cinco puntuales. Todos estos aspectos son decisivos para el conocimiento y mejora de las técnicas de restauración dunar. Con ello, se pretende estudiar con una visión de conjunto el comportamiento natural y la respuesta de los sistemas dunares ante este tipo de obras de restauración, así como definir las actuaciones que en el futuro sean necesarias.

6.7 Mantenimiento

Las obras de restauración dunar que utilizan sistemas de regeneración ecológicos necesitan, a diferencia de la obra civil, un tiempo a partir de la ejecución durante el cual van actuando los procesos naturales. Por otro lado, estas actuaciones están influenciadas por múltiples factores ambientales que determinan unos procesos dinámicos no siempre predecibles. Estos factores ambientales como son los temporales, el viento, etc., condicionan el éxito y la homogeneidad de los resultados.

Además, durante los períodos estivales, la afluencia de visitantes se hace masiva y como consecuencia, se incrementan los deterioros de las instalaciones y otras infraestructuras, lo que conlleva la necesidad de prever, durante un plazo no inferior a tres años, diversas tareas de mantenimiento y reparación que garanticen la viabilidad de los resultados.

Las labores de mantenimiento consisten fundamentalmente en controlar y en promover la adecuada evolución y desarrollo vegetal de las plantaciones realizadas, con la reposición de las marras producidas y comprobando que se adquieren las coberturas y portes deseables con el paso del tiempo, manteniendo unas condiciones de conservación y dinámica adecuadas.

También será necesario realizar, de modo continuado, un seguimiento del estado de los captadores de arena durante su fase funcional (unos dos años), y del estado general de conservación de las instalaciones como pasarelas, cerramiento, carteles, etc., reparando los desperfectos en la medida que puedan surgir, para permitir en todo momento el uso y disfrute del área.

Se considera que anualmente se producen deterioros, marras, etc. en aproximadamente el 10% de las labores de restauración realizadas.

Los aspectos que se deben incluir son los siguientes:

Replantaciones

Se realizarán en áreas que presentan pérdida de vegetación dunar por deterioro o pisoteo, en zonas donde se hayan dado unas marras superiores al 30% y donde aparezcan procesos erosivos nuevos o en áreas no contempladas originalmente en el proyecto, pero que necesiten mayor estabilización.

Reposición de captadores de arena

Se llevarán a cabo donde presentan deterioros, si están derribados o rotos por el viento, o por la entrada de personas a las zonas en recuperación, etc. y en zonas donde se hayan enterrado con mayor rapidez de la esperada, si se considera necesario elevar la altura del cordón dunar.

Reparación y/o reposición del vallado

Donde el vallado haya quedado tirado o enterrado, deteriorado o su funcionalidad no sea la adecuada.

Reparación de las pasarelas peatonales

Se deberán reponer lo antes posible para permitir el acceso a la playa y evitar el paso por las zonas restauradas.

Reposición de los sistemas de información

Dado que constituyen un elemento importante de cara a la aceptación, comprensión y respeto a las obras por parte de la población, se deben reponer cuando se deterioren.

Eliminación de vegetación invasora

La eliminación de la vegetación invasora es un proceso que requiere un esfuerzo continuado en el tiempo para eliminar los rebrotes, nuevas colonizaciones y la germinación de semillas latentes a lo largo de los años. Las labores de mantenimiento deben dirigirse a la prospección de posibles rebrotes y a su eliminación urgente, con el objeto de impedir la rápida expansión que caracteriza a este tipo de vegetación

7

Métodos de cultivo de plantas dunares

7.1

Introducción

En este capítulo se describen las distintas técnicas que se emplean actualmente para la obtención de plantas de duna, especialmente de las especies más características de los ecosistemas dunares, como el barrón (*Ammophila arenaria*) y la grama marina (*Elymus farctus*), que son las responsables de la fijación de la arena en los sistemas dunares naturales.

El cultivo de otras especies dunares también es posible y se lleva a cabo en vivero en España (como por ejemplo, los viveros de El Saler, en el municipio de Valencia). Muchas de estas especies dunares son anuales y su cultivo exige la plantación en un período muy definido, ya que al cumplir su ciclo anual mueren. Además, un gran número de estas especies tienen un tamaño muy pequeño y su cultivo es complicado y costoso, por lo que, en la mayor parte de los casos, las plantaciones se limitan a la grama marina, en la duna embrionaria y al barrón, en la duna secundaria.

Una vez que el sistema dunar queda más o menos estabilizado por la vegetación plantada, la mayor parte de las especies consiguen colonizar por sus propios medios, por lo que, normalmente, estas dos especies son las únicas utilizadas en las plantaciones en la mayor parte del litoral en Europa, (excluyendo las Islas Canarias, donde la vegetación de los sistemas dunares es muy diferente).

En los casos en los que sea necesaria la plantación de otras especies, se deberá plantear la necesidad de su producción por lo menos, con dos años de antelación, para que dé tiempo a recolectar la semilla en su momento apropiado y a su posterior cultivo. La producción de plantas dunares permite disponer de vegetación autóctona para los trabajos de regeneración de sistemas dunares. Esto supone una gran ventaja debido a la dificultad que presenta el encontrar estas especies en el mercado.

La metodología de su cultivo depende de las condiciones ambientales de cada zona. Así, por ejemplo, en España la planta se obtiene mediante el cultivo de semillas. Mientras que en países como Holanda, utilizan el método de la entresaca de plantaciones naturales, ya que el cultivo de semillas no es viable debido a su baja fertilidad. La entresaca en España no es recomendable, ya que las zonas dunares poseen una escasa superficie y cobertura vegetal.

Los trabajos de investigación, cultivo y restauración de los ecosistemas dunares vienen realizándose en Europa, y especialmente en países como Holanda, Francia, Inglaterra y Dinamarca, desde comienzos del siglo XX, donde se han desarrollado diversas técnicas de cultivo en vivero, basadas principalmente en la reproducción vegetativa, es decir, por división de mata, entresacando en formaciones densas de este tipo de vegetación dunar.

7.2

Tipos de reproducción vegetal

Los vegetales se pueden reproducir sexual o asexualmente. La principal diferencia es que en el caso de la reproducción asexual, los descendientes provienen de un único progenitor con la misma carga genética, por lo que se trata de individuos clónicos. En el caso de la reproducción sexual, el material genético de los descendientes proviene de la combinación de los genomas de los progenitores, por lo que la descendencia no tiene la misma información genética y, por tanto, existe un contenido genético con mayor diversidad.

Este aspecto es muy importante debido a que las poblaciones clónicas tienen mucha menor capacidad de adaptación ante los cambios de cualquier tipo, no permitiendo la evolución de la especie.

Cuadro 7.1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de reproducción

La reproducción *sexual* tiene varias ventajas para la planta. Permite la formación de nuevas combinaciones de genes, las cuales pueden favorecer su adaptación al hábitat. Además, los frutos y semillas de muchas plantas poseen varios mecanismos de dispersión, lo cual permite a éstas extender su límite biogeográfico.

La reproducción *asexual* implica la formación de descendientes sin la fusión de gametos. La descendencia es genéticamente idéntica a la planta progenitora.

La reproducción *vegetativa* es la que se lleva a cabo a partir no de órganos sexuales (flores) sino de otros órganos vegetativos, como raíces, tallo u hojas.

Los términos reproducción asexual y reproducción vegetativa no son sinónimos, pues aunque la mayor parte de la reproducción asexual es vegetativa, ciertos vegetales han desarrollado un tipo de reproducción denominada "apomixia" mediante la cual la planta madre produce un embrión a partir de una célula diploide, que crecerá dando lugar a un individuo idéntico al progenitor.

En los cultivos industriales y en la agricultura, se obtienen mejores rendimientos con los cultivos clónicos, dado que tienen una respuesta muy homogénea, su manejo es más sencillo y se obtiene una mayor productividad. Sin embargo, en los trabajos de restauración ecológica se trata de reintroducir toda una población con una diversidad genética suficiente, de tal manera que puedan establecerse en sus nichos ecológicos e integrarse en el sistema natural con la menor intervención humana posible.

El barrón y la grama marina se reproducen de manera natural de ambas maneras: sexualmente, por semillas y asexualmente, por medio de estolones y rizomas, aunque en realidad, la mayor parte del desarrollo de la vegetación en sistemas naturales proviene de reproducción asexual. Además, el barrón presenta dos subespecies en Europa: *Ammophila arenaria arenaria*, cuya distribución se extiende desde Escandinavia hasta el sur de Francia y *Ammophila arenaria australis*, que ocupa los hábitats dunares de la Península Ibérica y el Mediterráneo. Ambas subespecies tienen comportamientos distintos en cuanto a su reproducción, ya que las semillas de la subespecie del norte de Europa son mucho más estériles que la subespecie ibérica y mediterránea. Por este motivo, las técnicas de reproducción y plantación del barrón se desarrollaron por el sistema asexual. No obstante, en España, aunque en sus primeros inicios los sistemas de producción de vegetación dunar se basaron en las técnicas de reproducción asexual, ahora se realiza a gran escala por métodos sexuales, es decir, por semilla.

En los sistemas dunares naturales las plantas de barrón se reproducen principalmente por rizomas, debido a que, aún produciendo gran cantidad de semilla, las condiciones ambientales a las que están sometidos estos tipos de sistemas son extremas lo que impide, normalmente, su desarrollo hasta el estado adulto.

7.3 Especies utilizadas en la restauración de ecosistemas dunares

La mayor parte de las plantas dunares son cultivables, aunque su cultivo, y en especial, la necesidad de provisión de una cantidad importante de semillas, es costoso y complicado. Por otra parte, tradicionalmente en Europa, el barrón ha sido casi la única especie utilizada en la estabilización de sistemas dunares, motivo por el cual es la especie más ampliamente cultivada.

Al final del capítulo, se detallan las especies dunares que se cultivan en España (ver Tabla 7.2).

De todas esas especies potencialmente cultivables, las más comunes que se cultivan en el vivero de Loredo (Cantabria) son las siguientes:

Barrón *(Ammophila arenaria)*

Se trata de una gramínea cuya época de floración tiene lugar entre mayo y julio. Su estrategia de reproducción en sistemas naturales es mediante rizomas subterráneos, sin embargo, en vivero se puede reproducir mediante semilla.

En vivero se pueden realizar dos tipos de siembras de *Ammophila arenaria*. Por un lado, siembras directas en el exterior del vivero y por otro, en contenedor bajo los invernaderos. De siembra directa se realiza una cosecha anual en primavera o en otoño. En invernadero se pueden llevar a cabo varias cosechas anuales dependiendo de la situación geográfica del vivero y de las condiciones de cultivo (fundamentalmente, calefacción, riego y fertilizantes).

Grama marina *(Elymus farctus)*

El sistema de reproducción de esta especie en la naturaleza es semejante a la del barrón, es decir, se reproduce mediante rizomas. Si bien no tiene tanta capacidad de fijación como el barrón, estabiliza y recubre las dunas primarias o embrionarias, permitiendo posteriormente al barrón colonizarlas de acuerdo con el fenómeno de sucesión ecológica en los ecosistemas dunares.

En vivero se reproduce normalmente por división de mata debido a la dificultad de la recolección de semilla.

Azucena marina *(Pancratium maritimum)*

En vivero se producen tanto con semillas en invernadero como en el exterior, aunque dado el largo periodo de tiempo que necesita para alcanzar su estado adulto (tres años), es más recomendable su siembra en exterior. Además, dado el gran tamaño del bulbo, su desarrollo en contenedor es mucho más limitado. Aparte de esta reproducción sexual, también se consiguen buenos resultados con la plantación de bulbos recolectados en las playas cuando por el efecto de los temporales se destruyen las zonas dunares más expuestas al oleaje.

7.4

Características del cultivo de plantas dunares

Como en cualquier especie, el cultivo de las plantas dunares debe realizarse en un ambiente lo más parecido al medio natural donde éstas se desarrollan. En el caso de las dunas costeras, este ambiente está caracterizado por un substrato arenoso, móvil y una salinidad en la atmósfera producida por la influencia del mar (maresía). Por este motivo, y dado que el hábitat de las dunas es tan particular, la localización de un vivero de plantas dunares debe ubicarse lo más cerca posible de la costa, sobre un substrato de arena de procedencia marina y donde no aparezca vegetación diferente a la dunar.

También es posible cultivar plantas dunares en viveros situados en el interior, pero cuando las plantas alcanzan su estado adulto, deben estar sometidas a las condiciones ambientales dunares, ya que en caso contrario, degenerarían rápidamente.

Dado que estas plantas son utilizadas en las obras de restauración y, debido a la irregularidad en la realización de estas obras, y por tanto, en la extracción de las plantas, es necesario mantenerlas en el vivero algunos años hasta que se plantan. Por este motivo, se debe prever un emplazamiento donde permanezcan hasta su extracción. Este lugar debe estar sometido a unas condiciones lo más parecidas a las naturales (substrato arenoso, enarenamiento e influencia de la maresía, pues de lo contrario degeneran y, en el mejor de los casos, el esfuerzo necesario para su mantenimiento lo hace inviable).

En concreto, el vivero que la Dirección General de Costas posee en Loredo (Cantabria) está situado en una zona de duna terciaria, sobre un substrato arenoso relativamente móvil y sometido a suficiente influencia marina.

La principal ventaja que se obtiene cuando se cultiva en un terreno de estas características es evitar la proliferación de plantas competidoras, ya que solamente las plantas dunares están adaptadas a estas condiciones ambientales. Las plantas invasoras que colonizan el nicho de las plantas dunares compitiendo con ellas y desplazándolas constituyen una excepción. Sin embargo, aunque es un gran problema para los sistemas dunares, en los viveros no constituyen una limitación importante para su cultivo.

7.5 Producción de barrón

7.5.1 Reproducción asexual

Existen varios sistemas de reproducción asexual de barrón, entre los que destacan el método holandés y la propagación mediante rizomas.

Método holandés: Consiste en la entresaca de barrón mediante un corte en la base del tallo, por debajo del segundo nudo. Este proceso tiene la ventaja de permitir el brote de nuevos tallos ya que el sistema radicular (rizomas) permanece en el suelo reteniendo la arena y produciendo nuevos vástagos. Una vez transplantado el material al vivero, se divide en ramilletes de tallos que son introducidos en el suelo a una profundidad de 30 cm. El enraizamiento tiene lugar a partir de los nudos basales del tallo al cabo de unos pocos meses.

Propagación mediante rizomas: Este sistema se lleva a cabo a pequeña escala. El rizoma del barrón, una vez extraído del suelo, se corta en fragmentos de 10 a 15 cm que son plantados en surcos de unos 25-30 cm de profundidad. En condiciones adecuadas los rizomas producen, al cabo de unos meses, nuevos vástagos.

7.5.2 Reproducción sexual

Durante estos años, especialmente en el caso de la producción de barrón, se ha conseguido desarrollar y perfeccionar el cultivo mediante semillas obtenidas por recolección en formaciones naturales. Esto supone numerosas ventajas respecto al sistema de división de mata utilizado en otros países europeos. Además de las desventajas en cuanto a volumen de producción y diversidad genética de la reproducción asexual, para la obtención de material vegetal se necesitan grandes superficies de vegetación dunar densa, hecho poco frecuente en España, donde estas formaciones o son pequeñas o se encuentran en proceso de degradación.

Además, hay que añadir en favor del cultivo a partir de semillas, el hecho de que la recolección de semillas en los ecosistemas dunares no supone apenas daño para la vegetación existente, puesto que el principal sistema de reproducción de estas especies en estado natural es mediante rizomas. Al mismo tiempo, el mantenimiento de la identidad genética es mejor en el caso de la reproducción sexual por semillas, puesto que se consigue una mayor variabilidad y riqueza genética de la población cultivada.

Asimismo, con el sistema de la reproducción por semilla se consigue una mayor cantidad de plantas, siendo más rentable que el de reproducción vegetativa. Por otro lado, las plantaciones obtenidas por semilla presentan un mayor vigor y adaptación a las nuevas condiciones una vez plantadas.

Por último, la recolección de semillas permite su transporte desde grandes distancias hasta el vivero sin que se produzcan pérdidas. De esta manera, se puede cultivar casi cualquier tipo de planta dunar en vivero independientemente de su procedencia, por lo que se puede establecer un sistema de actuación generalizado válido para todos estos ecosistemas costeros.

7.5.2.1 Recolección de semillas

Para obtener una cantidad suficiente de semillas para las cosechas es necesario recolectarlas en formaciones naturales de estas especies. El barrón es una especie "vecera", es decir, que presenta irregularidades en su producción de semilla, teniendo años muy productivos frente a otros muy poco productivos, sin razón aparente. Además, la época de floración y fructificación es variable en función de la climatología. Por este motivo, el proceso de recolección requiere la observación de la vegetación desde la floración. En España, la floración comienza hacia marzo o abril en las costas andaluzas y hacia mayo o junio, en las cantábricas. La maduración de la semilla tarda unos dos meses, es decir, entre mayo y junio, en el sur y entre junio y julio, en el norte. Una vez madura la semilla, permanece durante pocos días en la espiga y es alimento de muchas aves e insectos, por lo que es necesario recolectarlas durante un período muy corto.

La recolección de semillas es una operación que se realiza, dentro de lo posible, en las proximidades de las zonas donde se prevé la ejecución de obras de regeneración dunar. Este aspecto es muy importante a nivel ecológico, pues no se está introduciendo una variedad genéticamente pura sino un "pool genético" idéntico al existente, por tanto, no existe una interacción genética negativa entre la vegetación existente y la introducida, y de este modo, se reducen los efectos negativos tales como la hibridación o el mestizaje.

7.5.2.1.1. Prospección de zonas de recolección

El proceso de recolección comienza con el análisis de las poblaciones de barrón donde se va a realizar la recogida, observando el desarrollo y madurez de las plantas. A partir del momento en que se detecta el comienzo de la floración, deben realizarse visitas para determinar el gradiente de madurez a lo largo del sistema dunar y establecer las zonas donde la vegetación se encuentra en un estado óptimo. De este modo, se pueden concretar los lugares de comienzo de recolección y la dirección de recogida. En principio, la toma de muestras de semilla debe ser en espigas distantes entre sí.

Para observar el grado de madurez de las semillas se cortan las espigas aproximadamente por la mitad y se observan con lupa de campo. La semilla inmadura se reconoce por ser de color claro y de textura blanda. A medida que va madurando, cambia a un color amarillento y se endurece. La semilla madura es de color ámbar claro y se desprende fácilmente de la espiga.

Para facilitar su recogida, es conveniente realizar una cartografía básica de la vegetación centrada en el barrón y la grama marina. En ella se zonifica el área basándose en factores como la edad, la densidad de cubierta vegetal, el desarrollo de las plantas o la producción de espigas.

Se debe realizar también una campaña de toma de muestras de semilla de espigas distantes entre sí, ya que su estudio permite establecer el gradiente de madurez a lo largo de las dunas. De esta forma, se determina dónde se habría de empezar la cosecha y la dirección en la que se debe hacer.

La recolección de espigas de grama marina es normalmente menor, más lenta y laboriosa. No obstante, dado que la semilla no se desprende de la espiga, su recogida se puede dilatar en el tiempo.

7.5.2.1.2 Recolección

Normalmente, las campañas de recogida de semillas suelen durar de una a dos semanas. En caso de que la zona de recolección se encuentre alejada del vivero, es conveniente encontrar un lugar cerrado, pero aireado y seco, que sirva de almacén provisional para guardar la semilla hasta que finaliza la campaña y se realiza el transporte al vivero. Si la zona se encuentra cerca del vivero, el transporte de semilla se realiza diariamente al final de la jornada.



Foto 7.1. Espigas de barrón después de su recolección.

La recolección se lleva a cabo manualmente, cortando la espiga con tijeras de poda, y se transporta desde la zona de recolección hasta la zona de depósito en sacos que permitan la entrada de aire para evitar la humedad excesiva de las espigas. Allí se sacan de los sacos, se extienden en el suelo y se procede al secado. Para conseguir una mayor eficacia en esta operación, se extienden las espigas recolectadas en una superficie lisa y dura, de tal manera que no se pierdan las semillas que pudieran desprenderse. Además, esa superficie debe estar cubierta para evitar su exposición a posibles lluvias, vientos, etc.

El ambiente en el interior de la instalación debe ser seco, para que el proceso sea lo más rápido posible y se reduzca el riesgo de posibles infecciones por hongos, lo que daría lugar a la pérdida de la cosecha. El secado se suele realizar en el interior de invernaderos, ya que reúnen todas las condiciones

anteriormente mencionadas y es relativamente fácil controlar las condiciones de humedad y temperatura en el interior, además de otros problemas tales como la depredación del grano por insectos, aves o roedores. Además, al conseguir altas temperaturas, el proceso de secado es más rápido, reduciéndose el riesgo de infecciones por hongos.



Foto 7.2. Espigas extendidas para su secado.

La operación dura unos 5-7 días durante los cuales se somete a las espigas a un volteo por medio de horcas para airearlas y facilitar su secado. A medida que las espigas se abren, se procede a la separación del grano mediante su golpeo. Las espigas de las capas superiores van siendo retiradas a medida que pierden la mayoría de sus semillas, quedando de esta forma el material germinal acumulado en el piso previamente acondicionado, para que posteriormente sea fácil recoger la semilla con palas y no se mezcle con la arena.

7.5.2.1.3 Purificación y almacenamiento

Para la extracción de la semilla, la espiga se somete a un proceso de machaqueo continuado que libera el grano. A continuación, el conjunto formado por el grano, los restos de espigas y otras impurezas se limpian mediante cribas, utilizando mallas de diferentes tamaños de luz. Primero con tamaño de luz grande, en torno a 2 mm, permitiendo el paso de las semillas pero impidiéndoselo a los restos de la espiga. Para finalizar, la semilla es sometida a la criba con una malla de tamaño de luz en torno a 1 mm, que no permite el paso de la semilla pero sí a las partículas de arena, así como otras impurezas, quedando de este modo las semillas seleccionadas limpias y secas.



Foto 7.3. Semillas de barrón preparadas para su almacenamiento.

El grano obtenido en la cosecha se deposita en un almacén para ser utilizado en las siembras de esa temporada. En el caso de que se almacene durante más de un año, es mejor utilizar un banco de semillas donde pueden permanecer muchos años sin perder su capacidad de germinación.

En el banco de semillas se emplean recipientes herméticos con una humedad del 5% y una temperatura de entre -20 y -25 grados centígrados.

Cuadro 7.2. Banco de semillas

La finalidad principal del banco de semillas es su conservación. Las semillas se recolectan en las poblaciones naturales, siempre procurando recoger la mayor diversidad genética posible. Después se limpian y se deshidratan hasta el 5 por ciento de humedad. En estas condiciones se encapsulan en tubos de vidrio cerrados herméticamente y se conservan en una cámara de congelación a 25ºC bajo cero. De este modo, se puede conservar una gran diversidad genética en un pequeño espacio, manteniendo su viabilidad a largo plazo, posiblemente cientos o incluso miles de años.

Un banco de semillas consta de un edificio principal que contiene una cámara fría normalizada y otro espacio compartimentado para instalaciones auxiliares.

No es necesario adoptar medidas especiales para controlar la humedad relativa en la cámara fría, siempre que las semillas se guarden en recipientes herméticos. No obstante, a fin de evitar que se hiele el evaporador, y de mantener la integridad de aislamiento, es esencial que se reduzca al mínimo la entrada de humedad en el almacén. Además, para evitar el enmohecimiento de los materiales ferrosos, la humedad relativa no debe superar el 70 por ciento. Si se adoptan estas precauciones, la humedad relativa en el almacén se mantendrá automáticamente por debajo del 70 por ciento y, utilizando las técnicas habituales de refrigeración por compresores, posiblemente en niveles tan bajos como el 40 por ciento.

Además de almacenar las semillas en las instalaciones de almacenamiento prolongado, se deben realizar otras actividades como limpiar las semillas, secarlas, envasarlas y realizar ensayos para determinar su viabilidad, pureza y contenido de humedad.

Para el almacenamiento prolongado de cantidades no muy grandes de semilla, los congeladores tipo armario que funcionan a aproximadamente -20°C, como los domésticos, son muy útiles para conservar semillas durante mucho tiempo. Este tipo de congeladores suelen ser adecuados para guardar cantidades pequeñas de semilla, no obstante, no pueden sustituir satisfactoriamente a las cámaras frías grandes en el almacenamiento prolongado de grandes cantidades de semilla.

En el caso de la grama marina, aunque tiene una menor producción de espigas, la semilla tarda más tiempo en desprenderse de la espiga que en el caso del barrón, lo que permite un plazo de tiempo mayor para poder efectuar la recolección.

Sin embargo, en este caso, la fructificación es mucho menor, por lo que las semillas son mucho más difíciles de conseguir y su germinación es más lenta e irregular que en el caso del barrón. Además de barrón y grama marina, también se pueden producir en vivero otras especies típi-

cas de duna tales como la azucena de mar *(Pancratium maritimum)*, oruga de mar *(Cakile maritima)*, berza marina *(Calystegia soldanella)*, siempreviva *(Helichrysum stoechas)*, etc. En estas especies, dado que su volumen de producción es mucho menor, la recolección no requiere una labor de secado y purificación tan metódica. Se recolectan en el momento de su madurez y se plantan o almacenan tras un breve secado.



Foto 7.4. Semillas de azucena de mar.

7.5.2.2 Siembras de barrón

Al igual que para otros tipos de cultivos en vivero, existen dos posibilidades de realizar las siembras para la producción de especies dunares. Dependiendo del tipo de presentación que quiera darse al producto final, el tiempo de permanencia de las plantas en el vivero, etc., se pueden producir las plantas en contenedores o a raíz desnuda. La elección de una u otra opción condiciona el que las siembras se realicen en invernadero o en exterior.

7.5.2.2.1 Siembras de barrón en invernadero

El cultivo en invernadero permite controlar la temperatura y humedad de las siembras, con lo cual la germinación y crecimiento se aceleran, permitiendo obtener en menos tiempo, producciones más regulares y homogéneas. Como contrapartida, se obtienen plantas cuyos tejidos, al no haber estado expuestas a procesos climatológicos adversos (vientos, evaporación, etc.), son más débiles, y por tanto, más susceptibles de ser atacadas por hongos e insectos, por lo que necesitan un período de aclimatación en el exterior.

En las siembras bajo invernadero se emplean bandejas de contenedores cuyas dimensiones están estandarizadas. El principal problema del uso de contenedores es el enrollamiento de las raíces debido a que el espacio interior es muy limitado y las raíces crecen de forma caótica, siendo frecuentes los problemas de espiralización de las mismas. Para evitar estos inconvenientes, los contenedores suelen disponer de canales verticales laterales que guían el desarrollo de las raíces y reducen su espiralización.

Con el cultivo en contenedor, al utilizar substratos más o menos estériles, se reduce el contagio de patógenos del suelo y se evita el traslado de enfermedades al lugar de repoblación. El substrato de siembra se compone de una mezcla de arena de playa y turba en proporciones variables, aunque cuanto mayor proporción de arena presente la mezcla, menor es la retención de agua y más incómodo el manejo de los contenedores. La turba rubia de musgo *Sphagnum* tiene una alta capacidad para retener la humedad (15 veces su peso en seco), contiene una



Foto 7.5. Contenedores rellenos con substrato antes de la colocación de la semilla.

pequeña cantidad de nitrógeno (alrededor del 1%) y una acidez elevada que debe ser neutralizada mediante el aporte de dolomita en polvo u otro material básico neutralizante.

7.5.2.2.1.1 Proceso de siembra

Para proceder a la siembra de contenedores una vez colocados en el invernadero, deben rellenarse con el substrato hasta las 3/4 partes de su volumen y depositar la semilla (normalmente de 6 a 10 semillas para garantizar un número de plántulas superior a cinco). A continuación, se terminan de rellenar con una capa del substrato ya mencionado quedando las semillas a una profundidad de entre 2 y 3 cm. A partir de este momento, se deben mantener en el invernadero unas condiciones de humedad y temperatura adecuadas.



Foto 7.6. Distribución de las semillas en los contenedores.

La germinación varía en función de la temperatura del substrato. Cuanto más alta sea esta temperatura, antes germinarán las semillas. Dependiendo de la estación del año en la que se realice la siembra, el período transcurrido entre el proceso de plantación y la germinación de las semillas varía. En invierno, el substrato se encuentra a menor temperatura debido a que la temperatura exterior también es menor, con lo que la semilla germina aproximadamente a los 20 días de ser plantada. Sin embargo, en verano este período puede llegar a acortase hasta los 15 días.

Una vez que el tamaño medio de las plántulas es de unos 15-20 cm se procede al abonado de los contenedores, proceso que se describirá más adelante. El siguiente paso es su transporte al exterior para proseguir su desarrollo y aclimatación hasta su trasplante.



Foto 7.7. Contenedores sembrados.

Las primeras etapas de crecimiento también están influidas por la temperatura, de manera que la siembra realizada a finales de invierno suele necesitar de 3 a 4 meses para completar su desarrollo; la realizada en primavera suele necesitar de 2 a 3 meses para desarrollarse, y por último, la siembra realizada en otoño, aún permaneciendo dentro del invernadero, requiere hasta 5 ó 6 meses.

El uso de invernaderos en la producción intensiva de plantas supone grandes ventajas al conseguir una mayor producción en menor tiempo. Sin embargo, al tratarse de un cultivo de especies dunares que deben

soportar unas condiciones naturales extremas, la producción en invernadero con unas condiciones óptimas produce tejidos más débiles. Por ello, han de pasar un período de aclimatación en el exterior, lo que alarga el tiempo necesario para la obtención de plantas aptas para su plantación en obra.

Hay que resaltar el hecho de que la producción en invernadero presenta mayores riesgos por el ataque de hongos (especialmente hongos de cuello, royas y oídios) y áfidos (pulgones).

Por otro lado, las plantas producidas en invernadero soportan mucho menos tiempo en el contenedor, ya que el desarrollo de las raíces es mucho más limitado y no reciben aporte de arena como en el caso de las siembras directas. Por tanto, si no son extraídas al cabo del año y medio, comienzan una fase de degeneración drástica.

La producción en invernadero se realiza mediante bandejas de plástico de 28 contenedores de 400 cm^3 cada uno. Este volumen de contenedor es el más conveniente al permitir un buen desarrollo radicular y una mayor permanencia en el vivero, a diferencia de otros contenedores más pequeños. Asimismo, favorecen la supervivencia de las plántulas en el transporte a larga distancia y permiten de este modo, su uso en plantaciones en áreas alejadas del vivero, facilitando los programas de actuación de restauración dunar.

7.5.2.2.1.2 Cuidados y mantenimiento

Durante la fase de germinación y desarrollo es frecuente la aparición de plagas de hongos de cuello o la depredación de las semillas de los contenedores por micromamíferos o pájaros. En estos casos, una vez resuelto el problema, se procede a la resiembra de los contenedores afectados.

El siguiente paso es su traslado al exterior del invernadero para proseguir su desarrollo al aire libre, con el fin de favorecer su aclimatación a las condiciones naturales reinantes en el exterior hasta su transporte a las obras de regeneración.



Foto 7.8. Comienzo del desarrollo de las plántulas en contenedor.



Foto 7.9. Cultivo de barrón a los dos meses de la siembra.



Foto 7.10. Contenedores en el exterior para su aclimatación.

7.5.2.2.2. Siembras de barrón en el exterior

En las costas cantábrica y gallega, las siembras directas en el exterior se pueden realizar en primavera u otoño. Las siembras de primavera se llevan a cabo durante los meses de abril y mayo. Las de otoño, a finales de septiembre. En general, esta técnica ha dado muy buenos resultados. El período de desarrollo necesario para conseguir plantas de buen porte con un sistema radicular convenientemente desarrollado es de un año. Aunque el crecimiento de las plantas es más lento que en los invernaderos, este tipo de producción tiene muchas ventajas:

- La principal ventaja es el coste de producción por unidad de planta. Hay que tener en cuenta que para la producción de semilla a raíz desnuda se necesitan muchas menos instalaciones y cuidados que para los cultivos en contenedor, para los cuales se necesita un invernadero, substrato, un sistema de riego más sofisticado, mayores atenciones, lo que se traduce en costes de personal, tratamientos fitosanitarios, etc.

- Otra ventaja es la disponibilidad de plantas para la realización de obras de regeneración de sistemas dunares, ya que las cultivadas a raíz desnuda admiten una mayor flexibilidad. Se consigue una planta de gran vigor y mejor adaptada para el futuro trasplante a obra y además, aunque el tiempo que necesitan para su desarrollo es mayor que en el caso de los contenedores, pueden permanecer en el suelo durante más tiempo que éstos, pues al no tener el espacio limitado por el volumen del contenedor, sus raíces se desarrollan más y no sufren fenómenos de espiralización o estrangulamiento.

- La aclimatación de estas plantas en las zonas de regeneración es mejor que la de los plantones producidos en contenedor, ya que las condiciones de producción son más naturales.

- Se consigue un mejor aprovechamiento de la superficie del terreno debido a que se obtiene una mayor densidad de plantas por metro cuadrado.

- Los cultivos a raíz desnuda necesitan menor aporte de riego, ya que la evapotranspiración a la que están sometidos es menor.

- Las plantas son más resistentes frente al ataque de plagas y enfermedades, especialmente de pulgones y hongos, pues sus tejidos están mejor desarrollados.

- El transporte es más sencillo y menos costoso, aunque necesita más protección frente a la desecación e insolación.

7.5.2.2.3 Época de siembra

Las mejores épocas para realizar las siembras son durante la primavera y el final del verano, excluyendo desde la segunda quincena de junio hasta la segunda de agosto. En el caso de las siembras primaverales, antes de este período aún existe la posibilidad de perder parte de la cosecha debido a las bajas temperaturas y a posibles temporales que puedan suceder. Después de esas fechas, se corre el riesgo de no dar tiempo a la nueva planta a desarrollarse lo suficiente como para resistir los rigores del verano, sufriendo los efectos del calor e insolación cuando los tejidos de la nueva plántula son todavía demasiado tiernos y no tienen un sistema radical desarrollado que permita soportar la evapotranspiración. En el caso de las siembras de otoño ocurre lo contrario. Se debe esperar a que terminen los calores veraniegos, pero hay que sembrar lo suficientemente pronto para permitir un desarrollo mínimo de la planta antes de que llegue el frío.



Foto 7.11. Parcela preparada para la siembra.

7.5.2.2.4 Actividades previas a la siembra

Antes de proceder a la siembra es necesario preparar el terreno. Esto incluye las operaciones de desbroce y preparación de la superficie de siembra:

- **Desbroce.** Consiste en la eliminación total de la vegetación preexistente en la zona. Además de eliminar competidoras, facilita las siguientes fases a realizar.

- **Preparación del terreno.** Se refiere a las labores que se realizan sobre el suelo para facilitar tanto la colocación de semillas como su posterior desarrollo. Incluye las operaciones de nivelación de la superficie y la realización de un abonado de fondo.



Foto 7.12. Proceso de siembra.

7.5.2.2.5 Siembra

Una vez preparado el terreno se procede a la realización de surcos lineales de 1,2 m de largo paralelos entre sí separados una distancia no menor de unos 50 cm para permitir el desarrollo del sistema radical, aunque dependerá de la superficie disponible. Es importante dejar suficiente espacio entre filas para facilitar las operaciones de mantenimiento de los cultivos tales como escardas, etc.



Foto 7.13. Plántulas de barrón a los pocos días de su germinación.



Foto 7.14. Barrón a los nueve meses de la siembra.



Foto 7.15. Barrón adulto preparado para su traslado a obra.

Es vital la profundidad de la siembra para que la semilla se mantenga con un grado de humedad constante, pero no demasiado profundo porque la germinación sería más difícil o podría malograrse. La experiencia aconseja para la producción de barrón que los surcos donde se depositan las semillas sean de 10 cm de profundidad. Respecto a la densidad de siembra se ha estimado en 1 g/m, que equivale a una media de 15 plantas por surco (1,2 m).

A continuación, se tapan los surcos mediante un rastrillado de dirección perpendicular al mismo y se procede a realizar un riego sobre toda la superficie sembrada.

La operación de apertura de los surcos se puede realizar de modo manual o por medio de un apero. En el vivero de Loredo se utiliza un apero de labranza que permite arar cuatro surcos simultáneos, lo que supone una reducción notable del tiempo empleado. Se trata de un apero de labranza suspendido que es arrastrado por un tractor y posee un bastidor del que penden cuatro rejas separadas por 50 cm.

Al cabo de aproximadamente un mes desde la siembra, aparecen las primeras plántulas. Los primeros nudos en la base del tallo surgen a los tres o cuatro meses, señal de que la planta ha alcanzado la edad adulta.

7.5.2.2.6 Mantenimiento

Después de la siembra hay que realizar cada cierto tiempo operaciones de escarda para eliminar plantas competidoras, además de realizar otras operaciones de control fitosanitario, riegos, abonados, etc.

7.5.2.2.7 Resiembras

Como en el caso del cultivo en contenedor, aunque menos frecuente, pueden aparecer zonas de marras causadas por animales u hongos del suelo.

También en estos casos, una vez eliminada la causa, se procede a la resiembra. En estas situaciones, se produce un pequeño desfase en la germinación, a veces de un par de semanas, que no presenta ningún problema. Tras la siembra, deben repetirse sistemáticamente las labores de mantenimiento ya mencionadas. Las experiencias han demostrado que un aporte de arena suplementario durante el desarrollo de las plántulas en exterior favorece extraordinariamente el vigor de las mismas.

7.6

Grama marina

La grama marina se reproduce por métodos asexuales (rizomas) y por métodos sexuales (siembras). El primer método se realiza durante los meses fríos, ya que requiere bajas temperaturas. La recogida de rizomas tiene buen rendimiento cuando, debido a circunstancias especiales, hay amplias zonas donde puede llevarse a cabo. El material recolectado se guarda en sacos para transportarlo al vivero (o emplazamiento donde se llevará a cabo el proceso de trasplante). Una vez fragmentados los rizomas son enterrados a poca profundidad. En la primavera, de los rizomas brota la parte aérea vegetal que llega a cubrir la arena con una densidad media-alta.

La grama marina es pionera en la colonización de las arenas muy móviles y donde la humedad freática y la salinidad son mayores que en el caso del barrón.

Se sigue la misma metodología que para las siembras externas de barrón a raíz desnuda. Es decir, se comienza eliminando las malas hierbas, se realiza un abonado de fondo y se nivela la superficie. Posteriormente, se realizan surcos paralelos entre sí.

Las semillas se introducen a una profundidad de 10 cm, depositándose una densidad de semilla algo superior a la de la siembra de barrón. La cantidad de semilla utilizada es de 1,5 g/m. A continuación, quedan enterradas al nivelar la superficie con el rastrillo. Una vez realizada la siembra se somete toda la superficie a un copioso riego.

La germinación de esta especie es más lenta que en el caso del barrón. Normalmente no se inicia hasta los 40-45 días desde su siembra, siendo variable este período en función de las condiciones a las que esté sometida la plantación. A los tres meses de la siembra aparecen en la base del tallo los primeros nudos, entrando la planta en la fase adulta.

El cultivo de la grama marina se realiza a menor escala ya que su zona natural de plantación es mucho menor que la del barrón. Por otro lado, las semillas son más difíciles de conseguir y su germinación es más lenta.
La experiencia en este cultivo ha demostrado que la mayor producción se consigue mediante la división de mata, frente a la siembra directa en el exterior o la producción en invernadero.



Foto 7.16. Grama marina en estado natural.



Foto 7.17. Cultivo de grama marina.

7.7 Producción de Azucena marina

El cultivo por siembra en contenedor no ofrece unos resultados demasiado rentables, ya que a pesar de conseguir un buen nivel de germinación de las semillas, el gran desarrollo de la plántula hace que en un período corto de tiempo sea necesario su traslado y plantación en el exterior, para evitar la espiralización de las raíces.

El procedimiento de siembra de las semillas o bulbos en parcelas situadas en el exterior es similar al utilizado en las gramíneas, de modo que tras una limpieza y abonado de las parcelas de producción, se nivela la superficie y se siembran o entierran los bulbos en surcos. En ambos casos, la separación de los surcos deberá ser de al menos 50 cm, para permitir un buen desarrollo de las plantas.

El período de germinación y la velocidad de desarrollo es variable en función de si se trata de semilla o de bulbo. En este último caso, se considera que una vez pasado el primer otoño, las plantas ya pueden ser trasplantadas. En el caso de las plantas obtenidas por semillas, es necesario esperar 2,5 ó 3 años para conseguir una planta apta para el trasplante.



Foto 7.18. Cultivo de azucena de mar.

7.8

Producción de otras especies

La grama marina y el barrón son las plantas estructurales de la vegetación de las dunas. No obstante, existe un buen número de especies acompañantes que, aunque no son las responsables de la fijación y estabilización de los depósitos arenosos de las dunas, promueven una mayor biodiversidad en las zonas que se van a restaurar, facilitando la entrada de otros componentes del ecosistema y proporcionando un mayor valor ecológico a las zonas donde se introduzcan.

En este sentido, se han realizado diversos ensayos de cultivo con especies características de los ecosistemas dunares, tales como polígono marino (*Polygonum maritimum*), cardo marino (*Eryngium maritimum*), siempreviva (*Helichrysum stoechas var. maritimum*), alhelí de mar (*Malcolmia littorea*), berza marina (*Calystegia soldanella*), clavelina (*Dianthus gallicus*), algodonosa (*Otanthus maritimus*) y oruga de mar (*Cakile maritima*).



Foto 7.19. Cultivo de cardo marino.



Foto 7.20. Cultivo de oruga de mar.

Las experiencias llevadas a cabo hasta el momento se han encaminado al trasplante, dada la dificultad de disponer de un volumen importante. Los resultados obtenidos no han sido del todo prácticos, consiguiéndose la supervivencia de algunas de las especies pero no su producción intensiva.

7.9 Operaciones de mantenimiento

La producción de plantas en vivero supone la realización de importantes tareas de mantenimiento. Además de los riegos durante la época seca, es conveniente realizar una fertilización adecuada. También es necesaria la realización de tratamientos fitosanitarios.

7.9.1 Riegos

Las plantas necesitan grandes cantidades de agua considerables para elaborar sus tejidos, del orden de 250 a 800 litros por kilogramo de materia seca. Este enorme consumo no sólo está justificado por las especies consideradas sino también por las condiciones climatológicas y por el tipo y humedad del suelo. Una carencia en la nutrición vegetal, una modificación de la relación evaporación/transpiración hacen variar sensiblemente la cantidad de agua que la planta debe absorber para producir 1 kg de materia seca.

Además, la distribución estacional de las lluvias es irregular y no asegura siempre un suministro de agua suficiente durante los meses de mayor crecimiento de la vegetación, que coinciden, generalmente, con los períodos de máxima evaporación. Sólo una pequeña parte de la lluvia es aprovechada por la planta, ya que la mayor parte se pierde por infiltración y el resto por escorrentía y evaporación en la superficie. Por tanto, los cultivos tienen unas necesidades de agua particularmente elevadas en ciertos períodos críticos.

Estas necesidades de agua, mayores que las de la vegetación natural, se deben, entre otras razones, a la densidad forzada del cultivo y a la necesidad de un desarrollo más rápido que en condiciones naturales. Además, desde el momento de la siembra, las plantas necesitan unas condiciones óptimas de humedad, que son mayores durante las primeras fases del ciclo vital de las plantas y van disminuyendo paulatinamente a medida que la plántula desarrolla su sistema radical.

Dependiendo de si el cultivo es a raíz desnuda o en contenedor, es decir, en el exterior o en invernadero, las necesidades de riego, así como el sistema empleado, variarán. Los sistemas de riego más utilizados son por inundación de superficie, a pie o por surcos, a presión (aspersión, difusión,...) y a baja presión (goteo, microaspersión,...).

Teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes que plantea cada uno de los sistemas de riego, las características del substrato empleado en el cultivo y las necesidades de las especies

dunares, se recomienda la utilización del riego por aspersión en los cultivos realizados en el exterior y la difusión, en los cultivos en invernadero. El uso de estos sistemas de riego implica un menor coste de mantenimiento, una rápida amortización de la instalación y un buen aprovechamiento del agua.

En el caso de las siembras realizadas en invernadero, desde el momento de la siembra hasta la salida al exterior, es necesario realizar un seguimiento constante de las plantas, sobre todo durante las primeras fases del desarrollo para determinar las necesidades de riego que permitan mantener la humedad óptima.

Una vez realizado el traslado de los contenedores al exterior, el desarrollo de las plántulas permite espaciar los riegos, además de que en el exterior la temperatura es algo menor. En el sistema que se utiliza en el vivero de Loredo, los riegos se realizan cada 3 ó 4 días en períodos calurosos (julio - agosto) y cada 6-8 días, cuando las condiciones de temperatura se suavizan. En cualquier caso, estos períodos de riego son siempre variables en función de las condiciones climáticas reinantes (precipitación y temperatura). En otros viveros ubicados en otras zonas más cálidas, obviamente las necesidades de riego son mucho mayores.

Cuando la siembra se efectúa en suelo, requiere menos riegos que la que se realiza en contenedores, pues al tener más desarrollado el sistema radical consiguen captar una mayor cantidad de agua del suelo.

El riego de cultivo en el exterior comienza en el momento de la siembra. Durante los primeros días y hasta que la germinación se ha completado, los riegos se realizan cada 2 ó 3 días, o menos frecuentemente si la pluviosidad es alta. Durante esta primera fase se debe mantener el suelo húmedo constantemente para favorecer el proceso de germinación. Desde este momento hasta la formación de los primeros nudos, las plantas se someten a riegos periódicos cada 4 ó 5 días.

Una vez que la planta ha alcanzado su fase adulta es menos dependiente de los riegos, pues en condiciones naturales soportan condiciones de aridez más o menos intensas. No obstante, la mayor densidad en el cultivo que en condiciones naturales, exige mayor cantidad. Por tanto, el agua es un factor limitante en su crecimiento. Con el objeto de lograr un crecimiento continuo durante todo el período de sequía las plantas cultivadas en el exterior se someten a riegos cada 5-7 días, o más si las condiciones de humedad así lo requieren.

El momento más propicio del día para regar es en horas de menor evaporación, cuando la temperatura del ambiente es baja, es decir, por la noche o a primera hora del día.

7.9.2 Abonados

Las sales minerales en solución en el agua del suelo constituyen la fuente de nutrientes esenciales para la planta. Éstas proceden bien de la mineralización de las reservas orgánicas del suelo, o bien de su aporte al suelo en forma de abonos. Los elementos esenciales se clasifican, según un criterio de cantidad, en macronutrientes y micronutrienetes. La diferencia se encuentra en las concentraciones relativas que presentan unos y otros en los tejidos vegetales. Se consideran **macronutrientes** aquellos minerales que están presentes en el tejido por encima del 0,1%, y son:

Carbono	C	Nitrógeno	N	Calcio	Ca
Oxígeno	O	Fósforo	P	Magnesio	Mg
Hidrógeno	H	Potasio	K	Azufre	S

Los elementos C, H y O, aunque son nutrientes, no se incluyen en la nutrición mineral, por no ser objeto de adición como fertilizantes a los cultivos.

El N, S y P, junto con C, H y O, son los constituyentes mayoritarios de las moléculas estructurales de las plantas, mientras que K, Ca y Mg, intervienen en la formación de proteínas. Por otra parte, todos estos elementos influyen en el metabolismo de las plantas.

Los **micronutrientes** son un conjunto muy numeroso, citándose a continuación los principales:

Boro	Bo	Cobre	Cu
Zinc	Zn		
Sodio	Na	Molibdeno	Mo
Hierro	Fe	Cloro	Cl

El nitrógeno, el fósforo y el potasio son los principales macronutrientes de las plantas y son necesarios para el desarrollo de las mismas. Las experiencias de abonado en Holanda, realizadas en zonas regeneradas, demuestran que las necesidades de nitrógeno son cuatro veces superiores a las de los otros elementos (fósforo y potasio), comportándose en la naturaleza como un factor limitante de crecimiento.

Dada la facilidad con la que ciertos nutrientes tienden a perderse por lixiviación y para mantener una concentración adecuada de los distintos elementos, se suelen utilizar abonos de liberación lenta, cuya característica principal es liberar su nitrógeno lentamente para limitar las pérdidas por lavado y adaptarse al ritmo de absorción de la planta, en función de la temperatura y la actividad de los microorganismos del suelo.

Los abonos que suelen emplearse para la producción de plantas típicas de duna son los denominados abonos complejos. Se trata de mezclas de abonos en forma granulada que contienen los principios fundamentales de la nutrición vegetal, nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos, como azufre y calcio. El nombre del fertilizante viene dado por su fórmula, en la que la primera cifra indica el porcentaje de riqueza en nitrógeno, la segunda la de fosfórico (P_2O_5), y la tercera la de potasa (K_2O). Así, el abono conocido como 15 - 15 - 15 indica las concentraciones de N, P y K del mismo.

Una cualidad de los abonos complejos es el gran contenido total de principios nutritivos, ya que se puede concentrar en poca cantidad una gran riqueza nutritiva para las plantas, que se traduce en la disminución del volumen de fertilizante, un menor espacio de almacenado, economía de transporte, etc. Además, su estructura granulada retarda la disolución de estos abonos en los líquidos del suelo, para que las plantas los aprovechen al máximo.

Las fórmulas más convenientes de estos abonos son las de mayor riqueza en nitrógeno con respecto al fósforo y potasio. Entre las citadas anteriormente reúnen esta condición las fórmulas 20 - 10 - 10, 25 - 10 - 0 y 15 - 15 - 15.

En el cultivo de plantas dunares en vivero, además de emplear un abono de fondo de acción lenta incorporado en el substrato de siembra, se realiza también un abonado de cobertera en las épocas de crecimiento. Suele utilizarse nitrato amónico de media graduación (26% N). Los nitratos son solubles, ionizándose en la solución del suelo, cuyo anión NO_3^-, penetra en profundidad con la lluvia, riego o rocío sin necesidad de labor de incorporado. Son absorbidos por todas las plantas en 24 horas. Por otra parte, tienen carácter oxidante y proporcionan oxígeno del anión NO_3^- para la respiración de las raíces, por lo que participan de un efecto nutritivo doble con la cesión del nitrógeno y del oxígeno. Además, la parte amoniacal queda retenida por el suelo actuando más lentamente, relevando al nitrógeno nítrico ($N\text{-}NO_3$) cuando éste ha sido absorbido o lavado. Los aportes de este abono se realizan por fases, en función de las necesidades de las plantas. Cuando éstas dan señales de carencia de nitrógeno, se les suministra el fertilizante. Los resultados se hacen notar con un notable vigor al poco tiempo de su aplicación. Se aconseja aplicar el abono en pequeñas dosis para no provocar un desarrollo excesivo de la parte foliar, que podría causar un desequilibrio de la planta.

Existen dos condicionantes importantes a la hora de fertilizar los cultivos:

1. Dado que la planta necesita tener bien desarrollado el sistema radicular para la absorción del fertilizante, no es conveniente abonar los cultivos hasta que dicho desarrollo haya sido alcanzado.

2. El substrato arenoso es altamente permeable, por lo que durante los meses de lluvia se produce un lavado y pérdida del fertilizante hacia el subsuelo.

Una alternativa a los fertilizantes solubles es la utilización de fertilizantes de liberación lenta, es decir, que no liberan todos los nutrientes disponibles en el momento de su aplicación, sino que lo hacen durante un período de tiempo más o menos largo. La liberación de los nutrientes es variable según el producto y depende de los niveles de humedad del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiológica. Básicamente existen dos tipos: los de nitrógeno de solubilidad lenta y los recubiertos. El objetivo final de este tipo de fertilizantes es liberar nutrientes al mismo ritmo de la demanda de la planta y de esa forma evitar pérdidas. Esto conlleva una mejor eficiencia en su utilización al optimizar la calidad de la planta, disminuyendo la frecuencia en la fertilización y las pérdidas por lixiviación.

En cuanto a la formulación, el elemento más importante para la nutrición de la vegetación dunar y en especial, de las gramíneas, es el nitrógeno, que constituye un factor de crecimiento para dichas plantas.

Por tanto, se recomienda la aplicación de fertilizantes de liberación lenta, con una elevada proporción de nitrógeno. Entre los más útiles para el cultivo de plantas dunares está el 18-9-10 + microelementos con un periodo de liberación de hasta 14 meses.

Su aplicación deberá realizarse a principios de la primavera al cabo de un año de la plantación. Las dosis recomendadas son algo menores de las aconsejadas para suelos normales (no arenosos) y oscilan entre 500 y 1.000 Kg/ha.

7.9.3 Aportación de arena

La aportación de arena al cultivo de plantas dunares ha demostrado ser de gran utilidad. Este tipo de plantas, especialmente las que habitan en el frente dunar, y en concreto, el barrón y la grama marina, necesitan un aporte constante para mantener su vitalidad. En condiciones naturales, el crecimiento y vigor de estas plantas es óptimo con un aporte de aproximadamente 30 cm al año.

La ubicación de los aportes de arena es de vital importancia, ya que es el viento el que extiende la arena sobre la parcela de cultivo, por lo que la acumulación de la misma debe realizarse a barlovento del vivero, con el fin de que los vientos dominantes extiendan la arena sobre las cosechas.

7.9.4 Correcciones del substrato

Las correcciones del substrato tienen como finalidad neutralizar el pH del mismo. En general, los suelos ácidos se neutralizan adicionándoles cal viva o dolomita en polvo. Mientras que los alcalinos se mejoran por la aplicación de yeso y cierto tipo de fertilizantes (sulfato amónico y potásico) que, al tener pH ácido, disminuyen la alcalinidad del substrato.

En el vivero de Loredo, para las siembras de barrón en invernadero, el substrato utilizado está compuesto por una mezcla de turba y arena. Para corregir la acidez que la turba proporciona al substrato se le aplica un aporte de dolomita en polvo, que hace que el pH ácido suba a un pH entre 8.5 y 9, ya que, aunque el barrón en condiciones naturales puede soportar un rango de pH muy elevado (pH entre 4 y 9), las arenas de los ecosistemas dunares cantábricos son en general básicas y carbonatadas.

Por último, mezclado con el fertilizante se suele utilizar carbonato cálcico ($CaCO_3$) inerte para el cultivo, tanto en contenedor como a raíz desnuda en los cultivos exteriores, lo que previene la acidificación del suelo.

7.9.5 Micorrización

Las micorrizas son asociaciones entre hongos y las raíces de las plantas que aportan un beneficio a ambas partes. En el caso de los sistemas dunares, se sabe que las micorrizas proporcionan beneficios nutricionales a las plantas colonizadoras, además de mantener a los granos de arena formando agregados.

Existe un gran vacío en el campo de investigación de la micorrización de especies vegetales dunares, sin embargo, sería interesante conocer más al respecto. En otros tipos de cultivos destinados a la regeneración de espacios degradados se utiliza esta técnica con gran éxito, ya que las micorrizas aseguran el futuro de la planta que se va a introducir en el medio a regenerar.

Existen varias formas de micorrización artificial que se pueden realizar en vivero:

- Incorporar arena procedente de un sistema natural al substrato en el que están creciendo las plantas.

- Hacer un triturado con carpóforos (cuerpos fructíferos) de los hongos que interese e incorporarlos al agua de riego de las plantas a micorrizar. En ocasiones, se hace con suspensión de esporas en solución acuosa. Con este método se suele asegurar la micorrización en un 60%.

- Otro sistema es el encapsulado de las semillas para siembra, el cual se hace con una pasta a base de triturado de cuerpos fructíferos. También se añade un soporte inerte para dar consistencia a la mezcla. Puesto que la planta que germina está en contacto con las esporas, es más fácil que sea infectada por los hongos.

Para conseguir que la micorrización se realice con éxito hay que tener en cuenta una serie de factores tales como la elección del hongo a utilizar; hay hongos específicos que sólo pueden infectar una especie determinada y hay otros que no tienen un campo de acción tan concreto, sino que pueden asociarse con casi todas las especies. Además, hay que tener presente la mayor o menor facilidad de manejo de un determinado hongo en laboratorio y vivero y después en el campo, ya que en ocasiones, tanto el cultivo del hongo como conseguir su estabilidad en el campo es un problema.

La micorrización de especies dunares, objeto de cultivo en vivero, es un campo virgen, muy poco estudiado. Según W.H. van der Putten, la colonización de dunas sin vegetación por el barrón deja algunas dudas en relación a su nutrición. En este contexto se ha sugerido la importancia de la presencia de microorganismos beneficiosos para la colonización de estas plantas de los ecosistemas dunares. Sin embargo, el estudio de la micorrización de las especies dunares, y particularmente, del barrón, sería muy interesante en cuanto a producción de plantas para su posterior utilización en la regeneración de ecosistemas dunares naturales.

7.9.6 Tratamientos fitosanitarios

En los ecosistemas dunares naturales, los organismos nocivos presentes en el suelo ocupan arena tanto de dunas móviles como fijas. Sin embargo, a pesar de la presencia de dichos patógenos en las dunas móviles, el barrón crece vigorosamente en ellas. El aporte de arena que recibe por parte del viento inhibe la acción de los patógenos del suelo, haciendo que no afecte a las raíces del barrón, ya que las plantas pueden producir nuevas raíces en la arena recién depositada en la duna por el viento. Cuando el sistema dunar llega a estar estabilizado, las plantas desarrollan su sistema radicular en arena que contiene patógenos, y las raíces que tienen aproximadamente un año comienzan a ser atacadas por ellos, dando lugar a una reducción en la longitud de las raíces e intensificación de su enrollamiento. Esto hace que las plantas sean más vulnerables a las condiciones extremas que se dan en los medios dunares, (aridez, falta de nutrientes, ...)

Se conoce desde hace tiempo la existencia de **Nematodos** parásitos en las áreas dunares que afectan especialmente al barrón y que condicionan y modifican la composición vegetal de las comunidades dunares. Estos Nematodos, o más concretamente, complejos hongo-Nematodo, que actúan asociados uno a otro, son en parte responsables del cambio de la vegetación de las

dunas secundarias (dominadas por el barrón) a dunas grises (en las cuales el barrón se encuentra en una fase regresiva).

Además de estos Nematodos, son frecuentes en el cultivo las plagas causadas por áfidos (pulgones) que invaden especialmente las hojas tiernas de las plantas de barrón cultivadas bajo invernadero.

Asimismo, son frecuentes las patologías causadas por hongos, sobre todo los de los géneros *Pythium* y *Fusarium*, que perjudican particularmente a los cultivos bajo invernadero, pero también a los cultivos en el exterior.

Los productos fitosanitarios que existen en el mercado son, hasta ahora, suficientes como para limitar sus efectos y poder controlar las plagas. Para su control, los tratamientos se dividen en dos grupos: tratamiento aficida para el control de pulgones y el tratamiento fungicida para prevenir ataques de hongos.

7.9.6.1 Tratamiento aficida

Este tipo de tratamiento se realiza en las siembras en invernadero, ya que estas plantas no son tan resistentes a los ataques de áfidos como las que se desarrollan en el exterior. Debido al menor desarrollo de la epidermis, la planta se hace más vulnerable frente a los ataques de estos insectos. Esto se debe a que dentro de las instalaciones encuentran una mayor protección contra las inclemencias meteorológicas y contra sus enemigos naturales, por lo que su erradicación resulta más compleja. Con el fin de que estas plagas no influyan en el normal desarrollo de las plantas, se realizan inspecciones visuales periódicas y tratamientos cuando se descubre su presencia.

Normalmente se emplean plaguicidas con dimetoato como materia activa, consiguiéndose unos resultados excelentes en cuanto a la eliminación de los áfidos. Sin embargo, se presenta el inconveniente de que se manifiestan efectos secundarios negativos en las plantas tratadas. Éstos incluso pueden acabar con la vida de los vegetales sometidos al tratamiento, por lo que la dosificación resulta comprometida.

No resulta aconsejable tratar a estas plantas durante largos períodos de tiempo. En cualquier caso, si el tratamiento es adecuado, los síntomas de estos efectos secundarios son leves y desaparecen por sí solos al poco tiempo de finalizarlo.

7.9.6.2 Tratamiento fungicida

Las patologías causadas por hongos, sobre todo los de los géneros *Pythium* y *Fusarium*, afectan especialmente a los cultivos bajo invernadero, pero también son frecuentes en los cultivos



Foto 7.21. Ataque de hongos en los contenedores.

en el exterior. Los síntomas del ataque por hongo son unas manchas oscuras que aparecen en la base del tallo. Al poco tiempo, la resistencia mecánica del tallo resulta resentida y la planta comienza a plegarse hasta yacer en el suelo, llegando a provocar su muerte. Para su control, se utilizan fungicidas en concentraciones adecuadas.

Respecto a los problemas de depredación, las semillas deben ser protegidas frente a los ataques de roedores y aves. Para el control de los daños producidos por ratones, se procede a la instalación de trampas por las instalaciones del vivero, que aún no siendo el método más efectivo sí es el más ecológico, ya que no se utiliza ningún tipo de sustancia química que pueda producir consecuencias negativas en las plantaciones. La depredación de semilla por parte de las aves se evita tratando las semillas previamente a la siembra con una sustancia repelente.

7.9.7 Resiembras

Cuando se producen plagas y, a pesar de los tratamientos fitosanitarios, las plantas mueren, éstas son reemplazadas realizando resiembras. Una vez resuelto el problema que causó las marras, las resiembras deben realizarse en el mínimo tiempo posible, ya que, en caso contrario, aparecen dificultades por competencia intraespecífica.

En los cultivos que se realizan en invernadero este desfase no supone, en principio, ningún problema, ya que estas plántulas, al criarse en contenedores individuales no tienen que competir por el espacio, nutrientes, etc.

Sin embargo, en los cultivos exteriores a raíz desnuda, las plántulas deben competir por los recursos y si se produjera un desfase demasiado grande (varios meses) en la edad de las plantas, supondría que las más nuevas estarían en desventaja frente al resto de la plantación, ya que las de mayor edad están más desarrolladas y preparadas para competir por los recursos naturales.

7.9.8 Control de malas hierbas

Para evitar la aparición de malas hierbas que puedan causar competencia interespecífica con los cultivos de plantas dunares es necesario realizar un seguimiento constante del desarrollo de la cosecha y aplicar los distintos métodos de escarda en función de las características de la

misma. En el caso de los cultivos realizados en invernadero, la escarda sólo puede hacerse manualmente, aunque no es del todo efectiva, ya que con frecuencia se fragmenta la planta objeto de extracción, volviendo a rebrotar.

Para los cultivos exteriores, además de las escardas manuales, pueden aplicarse herbicidas selectivos de gramíneas entre las filas de la plantación y nunca de forma directa sobre las hileras de plantas dunares para no afectarlas. Además, se deben seguir realizando escardas manuales selectivas dentro de las filas evitando con ello competencias por los nutrientes. Para obtener mejores resultados, se combinan ambos métodos de escarda.

7.9.9 Saneamiento de los suelos

Con el paso del tiempo, las arenas donde se establecen los cultivos exteriores van contaminándose de materia orgánica, especialmente la que proviene de las raíces de antiguos cultivos, así como de organismos patógenos, en concreto, el complejo Nematodo-hongo, de manera que debe efectuarse un saneamiento después de varias cosechas continuadas. Para eliminar el exceso de materia orgánica del substrato se utiliza un apero empleado normalmente para limpiar playas, que remueve y criba la arena. Con esta operación se elimina gran parte de los restos de materia orgánica.

Este método, sumado al aporte de arena limpia, permite realizar cosechas continuadas durante varios años.



Foto 7.22. Sistema utilizado para la limpieza de la arena.

7.10 Programa de producción

A continuación, se detalla el programa de producción que se lleva a cabo en el vivero de Loredo. Este programa es orientativo y puede adaptarse a las características propias de cada vivero.

Tabla 7.1. Programa de producción del vivero de Loredo

MESES / ACTIVIDAD	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Siembras invernadero												
10 cosecha		Siembra	Germinación	Salida Ext.								
20 cosecha				Siembra	Germinación	Salida Ext.						
30 cosecha		Salida Ext.								Siembra	Germinación	
Siembras exteriores												
Acondicionam. de parcelas	Desbroce		Desbroce	Arado	Abonado		Abonado		Desbroce	Abonado		
Siembra directa				Siembra	Germinación				Siembra	Germinación		
Escardas					Escardas			Escardas			Escardas	
Otras actividades												
Recolección de semillas				Prospección	Prospección	Recolección						
Limpieza y almacenaje de semillas						Limpieza	Almacenaje					
Resiembras				Resiembra		Resiembra						Resiembra
Riego						Riego	Riego	Riego	Riego			

Tabla 7.2. Especies dunares que se cultivan en España

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	FOTO
Ammophila arenaria	Barrón	Costas europeas, desde Noruega hasta el Mediterráneo.	Especie herbácea. Es el principal agente fijador de las dunas. Su máximo vigor se da en las dunas secundarias, pero su amplitud ecológica le permite colonizar dunas primarias y terciarias. Su gran capacidad de fijación de arena es debida a sus elásticos tallos, que recubren y protegen los depósitos arenosos frente a la erosión del viento, y a su potente sistema radicular.	
Asteriscus maritimus	Estrella de mar	Especie del Mediterráneo occidental. En la Península Ibérica se halla desde el Algarve hasta el sur de Valencia y Baleares.	Planta perenne, rastrera o ligeramente ascendente, de tallos leñosos en su base, postrados, rojizos, de grisáceos a parduscos cuando están secos, que pueden levantarse hasta 15 cm del suelo. Portan flores amarillas muy vistosas, de unos 5 cm de diámetro. Está compuesta por una pequeña mata redondeada. Se encuentra en ambientes litorales cálidos y secos, muy próximos al mar, lejos de las salpicaduras pero bajo la influencia de la maresía.	
Cakile maritima	Oruga de mar	Mediterráneo	Especie anual, forma parte de las comunidades de playa, especialmente en los lugares donde se acumula materia orgánica transportada por el mar, aunque alejada de las zonas más batidas. Es una especie pionera que coloniza los sistemas dunares primarios. Es característica de la primera línea de playa y hasta la base de la primera duna costera. La dispersión de las semillas se puede producir por el transporte de las corrientes marinas, lo que le permite tener una amplia representación en las comunidades de playa seca en el litoral.	
Calystegia soldanella	Campanilla de playa, Correhuela mayor o Berza marina	En toda la costa española, aunque en el suroeste es muy poco frecuente.	Planta perenne, inconfundible por la gran flor rosada de pétalos completamente soldados que aparece sobre la arena en verano. De tallos tumbados, reptantes, que crecen arraigados a la arena. Aprecia los suelos nitrogenados, se localiza en dunas primarias, secundarias y en menor medida, en dunas terciarias. Su sistema de tallos enraizantes favorece la fijación de la arena. Su porte rastrero y su propagación vegetativa hacen que sea una especie bien adaptada a zonas de alta movilidad de arena, evitando el enterramiento.	

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	
Crucianella maritima	Espiguilla de mar, Crucianela o rubia de mar	Región mediterránea occidental y litoral atlántico. Frecuente en las zonas más septentrionales.	Planta perenne de base leñosa, con frecuencia aparece inclinada o tumbada. Aunque se reproduce por semillas, tiene un notorio crecimiento vegetativo. Estas matas perennes son características de arenales y dunas costeras. Su hábitat óptimo son las zonas localizadas tras el primer cordón dunar, donde la movilidad de arena es baja. Sin embargo, puede aparecer en zonas de playa seca y en la ladera expuesta al mar de la primera duna más próxima a la playa en situaciones de, relativamente, escaso aporte de arena.	
Cyperus capitatus	Chuzo	Región mediterránea y litoral atlántico, escasa en la costa cantábrica. En las Islas Baleares no es muy frecuente.	Esta especie sólo vive en las playas y dunas litorales. De color verde glauco, presenta una inflorescencia compacta, con espiguillas grandes de 2 cm de longitud por 4 mm de ancho; en la base de la inflorescencia hay varias hojas lineales que sobrepasan las flores y que le dan un aspecto característico. Las hojas son planas y gruesas. Esta especie tiene rizomas subterráneos que le permiten colonizar el sistema dunar.	
Echinophora spinosa	Zanahoria marítima o bastarda	Región mediterránea. En España sólo en el este, desde Murcia a Gerona y Baleares.	Planta perenne, carnosa, muy ramificada, de hasta 70 cm de altura. Las hojas terminan en una espina, tiene flores blancas Es una de las especies que mejor caracterizan las comunidades vegetales colonizadoras de los arenales marítimos en las dunas primarias de la costa mediterránea.	
Elymus farctus	Grama marina	En toda la costa española.	Esta gramínea con menor porte que el barrón es la especie más característica de las dunas primarias. Es el principal agente vegetal en el proceso de construcción dunar durante sus primeras fases de desarrollo. Si bien no tiene tanta capacidad de fijación como el barrón, estabiliza y recubre las dunas primarias o embrionarias, permitiendo al barrón colonizarlas posteriormente de acuerdo con el fenómeno de sucesión ecológica en los ecosistemas dunares.	

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	
Eryngium maritimum	Cardo marino	Especie exclusiva de los arenales y dunas costeras activas del Mediterráneo, Mar Negro y oeste de Europa.	Planta perenne, se caracteriza por ser muy rígida y espinosa. Sus flores se agrupan en glomérulos compactos que pueden adquirir tonos azules. Florece al final de la primavera. Crece en dunas primarias y principalmente en dunas secundarias, donde contribuye a fijar la arena en profundidad gracias a su gruesa y fuerte raíz. Suele ser muy abundante en zonas con cierta presión humana por pisoteo, principalmente en las dunas más cercanas a la playa.	
Euphorbia paralias	Lechetrezna de las dunas	Región mediterránea y norte de África.	Especie perenne, que se caracteriza porque segrega un látex blanco que sale cuando se corta cualquier parte de la planta. Esta especie forma parte de las comunidades de playa seca y arenales móviles de las costas del Mediterráneo. Posee un potente sistema radical que ayuda a fijar la arena. Es capaz de resistir niveles medios de enterramiento, formando montículos en la playa seca. Se asienta principalmente en dunas secundarias, donde su raíz fija la arena en profundidad.	
Chamaesyce peplis (Euphorbia peplis)	Lechetrezna	Litoral mediterráneo, costa atlántica europea y Canarias.	Planta anual, glauca, algo canosa, postrada sobre el suelo, que tiene las hojas asimétricas verdes, a menudo rojizas, con un lóbulo bien visible en la parte basal. Las cápsulas quedan en la parte de abajo de la planta, tocando el suelo. Vive en las dunas y, actualmente, en el norte de la Península y en Cataluña. Es una especie difícil de encontrar, probablemente por la alteración del litoral.	
Helichrysum picardii	Siempreviva	Litoral de la Península Ibérica y norte de Marruecos.	Mata perenne, leñosa, densamente tomento-lanosas de color blanquecino. Esta especie es muy frecuente en dunas fijas y móviles. Suele aparecer tras el primer cordón dunar activo, en situaciones de escasa movilidad de sustrato, siendo una especie característica de las dunas fijadas con escasa o nula cobertura arbórea. También suele ser muy frecuente en el primer cordón dunar si éste tiene escasa movilidad de substrato debido a una falta de aporte de arena de la playa, tanto en costas estables como regresivas.	

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	
Helichrysum stoechas	Manzanilla bastarda	Toda la región mediterránea	Especie perenne, que crece en lugares secos, soleados y despejados y es muy frecuente en dunas. Sus hojas son lineares, pequeñas y blanquecinas y desprenden un olor bien característico. Las flores de color dorado también son características de esta especie. Puede llegar a ser abundante. Aparece en dunas secundarias estabilizadas y, sobre todo, en dunas terciarias.	
Juniperus phoenicea subsp. turbinata	Sabina	Mediterráneo occidental desde el sur de Francia a Marruecos, S y E de la Península Ibérica.	La sabina es un árbol o arbusto, a veces postrado, de hasta 3 metros, muy ramoso, de copa amplia. Hojas escamosas generalmente dispuestas en cuatro filas. Los frutos o gálbulos tienen forma esférica púrpura al madurar. Esta subespecie vive sobre substratos arenosos donde pueden formar sabinares compactos con ejemplares de gran tamaño.	
Limonium virgatum	Limonio, siempreviva	Toda la región mediterránea. En la Península, en la costa mediterránea, alcanza por el oeste hasta Cádiz y Huelva.	Planta perenne, glabras, muy variable. Tiene un tronco corto con hojas lineares más anchas en la parte superior y que a menudo adquieren coloraciones rojizas. Vive tanto en substratos rocosos como en suelos arcillosos de zonas húmedas.	
Lotus creticus	Cuernecillo marino	Toda la costa de la Península Ibérica, cuenca mediterránea y norte de África.	Herbácea perenne, leñosa en la base, cubierta por un denso tomento gris plateado. Tallos de hasta 1 m, rastreros, ramificados. Especie característica de playas y dunas costeras adaptada a condiciones de movilidad de arena, que evita el enterramiento por su porte rastrero. Es frecuente en comunidades de playa seca y en el primer cordón dunar activo.	

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	
Malcolmia littorea	Alhelí de mar	Toda la costa de la Península Ibérica.	Especie perenne cubierta de pelos. Las flores tienen cuatro pétalos de color rosa. Se asienta en arenales y dunas litorales, donde aparece tanto en comunidades de playa seca y primer cordón dunar como sobre sistemas dunares estabilizados. Es frecuente encontrarla con altas coberturas en zonas dunares degradadas.	
Matthiola sinuata	-	Toda la costa mediterránea.	Se trata de una planta de color verde ceniza, con las hojas muy divididas y el contorno un poco ondulado. Las flores de color violeta rosado tienen cuatro pétalos que se disponen en cruz. Los frutos son alargados y comprimidos. Se halla tanto en playas como en sistemas dunares.	
Medicago marina	Carretón de playa, Mielga marina	Toda la costa mediterránea. En la cornisa cantábrica es muy escasa.	Planta perenne, leñosa en la base, postrada, de entre 10 y 50 cm de porte. Recubierta de pelos blanquecinos que le confieren un aspecto algodonoso. De flores amarillas, sus hojas tienen tres foliolos Se desarrolla fundamentalmente en dunas secundarias pero puede aparecer en dunas primarias evolucionadas.	
Ononis natrix susbp. ramosissima	Bolina o pegamoscas		Mata pegajosa de hasta 60 cm. Tallos abundantes y ramificados en la base. Especie de distribución mediterránea que está presente en los arenales costeros de la Península Ibérica desde las costas catalanas hasta la zona central de Portugal, con una curiosa disyunción en la zona occidental de la costa cantábrica, ya que no está presente ni en la costa gallega ni en la asturiana.	

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	DESCRIPCIÓN	
Otanthus maritimus	Algodonosa	Toda la costa de la Península Ibérica, aunque en algunos lugares casi ha desaparecido.	EPlanta perenne, provista de numerosos tallos subterráneos horizontales, de los que surgen numerosos tallos verticales. Es característico su aspecto algodonoso, tanto que parece de terciopelo y se debe a que está totalmente cubierta de tomento blanco. Es muy abundante en las comunidades de la playa seca y primer cordón dunar. En dunas interiores crece en zonas de baja cobertura vegetal y cierta movilidad de substrato.	
Pancratium maritimum	Azucena de mar	Se distribuye por las costas mediterráneas, ascendiendo por las costas atlánticas sólo hasta la altura de la Bretaña francesa.	Planta bulbosa, perenne, con tallo herbáceo blanquecino que coloniza las playas y dunas que no sufren de una contaminación severa. El bulbo es de gran tamaño y puede llegar a alcanzar los 25 cm de largo. Las semillas son negras y brillantes con un tamaño de 1 cm y constan de una cubierta menos densa que el agua que permite que flote en el mar para aumentar las posibilidades de traslado a regiones alejadas de la planta madre. En los cordones dunares se puede encontrar en dunas activas principalmente.	
Poligomum maritimum	Corregüela de mar	Costas de toda Europa. Región mediterránea, hasta el Mar Negro. Toda la Península Ibérica.	Especie perenne, de fuerte raíz, leñosa. Se localiza en playas y dunas primarias, siempre en lugares de suelos sueltos donde se produce un aporte continuo de materia orgánica por parte de las mareas. Muy abundante en los arenales recientemente emergidos. Es de las primeras especies que aparecen en el proceso de sucesión primaria de las nuevas zonas emergidas.	
Silene ramosissima	-	Norte de África y Mediterráneo occidental, desde la costa portuguesa hasta Tarragona.	Hierba anual, cubierta en su totalidad de abundantes pelos glandulosos que le hacen viscosa al tacto y que produce que los granos de arena se adhieran a su superficie. Las hojas son enteras y ligeramente suculentas. Las flores, se hallan reunidas en inflorescencias de color rosado, con los pétalos bífidos y el cáliz recorrido por 10 nervios marcados y dientes agudos. Se puede encontrar en dunas secundarias principalmente.	

8

Ejemplos de actuaciones

8.1

El arenal de Liencres

Introducción y caracterización

El arenal de Liencres constituye uno de los más extensos y mejor conservados sistemas dunares del Cantábrico. Se encuentra en la margen derecha de la desembocadura del río Pas y forma un inmenso depósito arenoso de unas dimensiones de unos 950 m de longitud y 350 m de anchura media. La mayor parte del sistema dunar fue fijada durante la década de 1950 con pino marítimo (*Pinus pinaster)* para impedir el avance de la arena sobre los pastos y cultivos adyacentes, quedando sólo una tercera parte de terreno, la franja más cercana al mar, como sistema dunar activo.

El material sedimentario proviene del aporte del río Pas y que las corrientes y el oleaje devuelven a su desembocadura formando una flecha que progresa cerrando el estuario con dirección oeste. Su composición es básicamente calcárea. El extremo occidental está sujeto a una gran dinámica y cuando concurren avenidas fluviales y temporales marinos se producen situaciones muy destructivas, llegando a la desaparición total de la punta. Cuando las condiciones se estabilizan comienza otra vez el proceso constructivo de aporte de arena por el oleaje y la colonización de la vegetación.



Foto 8.1.1. Vista aérea de la zona de estudio.

El campo de dunas, además de tener un enorme valor paisajístico, contiene una gran riqueza florística, tanto por las especies típicamente dunares como por la gran diversidad de hábitats que presenta. El número de especies vegetales presentes en su sistema dunar supera en gran número el de otros sistemas dunares de todo el litoral cantábrico.

La vegetación dunar se estructura en bandas paralelas a la playa dando lugar a las dunas primarias o embrionarias, las dunas secundarias o dunas blancas y las dunas terciarias o dunas grises.

Entre las especies de plantas más representativas del hábitat de playa destacan el polígono marítimo (*Polygonum maritimum*) y la oruga de mar (*Cakile maritima)*.

La duna primaria se encuentra cubierta en todo el frente dunar por la grama marina (E*lymus farctus*), que ocupa prácticamente toda su superficie.

La duna secundaria, de gran actividad eólica, está poblada por el barrón (*Ammophila arenaria*), aunque también aparecen la lechetrezna de dunas (*Euphorbia paralias*), la espiguilla de mar (*Crucianella maritima*) o el lirio de mar (*Pancratium maritimum*).

Desde el punto de vista morfodinámico, ofrece ejemplos de los fenómenos que ocurren en zonas dunares, tales como la erosión y sedimentación de la arena eólica procedente del mar, la formación y evolución de pasillos de deflación, etc. Por otro lado, la componente fluvial ejercida por el río Pas tiene una enorme influencia en este arenal, ya que su extremo occidental se rompe cíclicamente cuando coinciden avenidas y temporales.

Problemática y situación de partida

La problemática que presentaba este sistema dunar era muy similar a la de la mayor parte de los sistemas dunares españoles. Hasta mediados del siglo XX, fue utilizado como zona de pastoreo y de extracción de arenas con destino a varios usos. Como consecuencia de la movilización de la arena hacia el interior, que tuvo lugar durante la década de 1940, las tres cuartas partes de su superficie fueron fijadas con plantaciones de pino marítimo.

Paralelamente al incremento de la industria turística en los alrededores durante los años 60 y 70 del pasado siglo, las extracciones de arena fueron aumentando hasta que, con la entrada en vigor de la Ley de Costas en 1988, finalizaron definitivamente. No obstante, ya se había extraído una gran cantidad de arena y el sistema estaba desequilibrado, lo que originó un movimiento de arena en dos frentes principales desde el cordón dunar costero hacia las zonas de extracción.

Por otro lado, dado que se trataba de una playa de gran popularidad, la presión turística fue incrementándose durante la segunda mitad del siglo pasado y, como consecuencia, la degradación de la vegetación llegó a ser muy notable. Como resultado se produjo una gran desestabilización del frente dunar, incrementándose los procesos de erosión y retirada del frente dunar hacia el interior, coincidiendo con períodos de temporales.

El cordón dunar frontal quedó reducido a unos montículos más o menos separados entre sí, incapaces de regenerarse de nuevo, debido a su morfología irregular causante de turbulencias eólicas y fenómenos erosivos locales y al efecto del pisoteo.



Foto 8.1.2. Temporal en Liencres.

Actuaciones

En el año 1999 se realizó la primera obra de recuperación ambiental del arenal de Liencres, cuyo objetivo fue la regeneración del frente de duna. En la actuación se incluyó, además de la propia regeneración mediante la instalación de captadores de arena y plantaciones, la instalación de elementos de protección, tales como cerramientos y pasarelas, para reducir el impacto de la frecuentación humana sobre la vegetación.

El resultado de la actuación fue muy positivo, habiéndose conseguido en pocos años la reconstrucción del cordón dunar costero y la colonización parcial de los dos grandes pasillos de deflación por donde se transportaba la arena hacia el interior. El sistema experimentó un notable crecimiento.



Foto 8.1.3. Transporte masivo de arena hacia el interior.

Posteriormente, durante los últimos diez años, se han venido ejecutando otras actuaciones, tales como nuevas replantaciones y reparación de las infraestructuras que habían sufrido daños por el desgaste natural y por vandalismo.

En estos momentos y gracias a los trabajos realizados, el sistema dunar presenta una buena cobertura vegetal, ha experimentado la captación de grandes volúmenes de arena, consiguiendo un frente dunar continuo en equilibrio con la dinámica sedimentaria de la playa, así como una más que aceptable cobertura vegetal.

No obstante, igual que en otros sistemas dunares en proceso de restauración, el crecimiento de la duna ha provocado el enterramiento de los cerramientos que se instalaron y con ello su pérdida de efectividad.



Foto 8.1.4. Detalle de fenómenos erosivos en el frente dunar.



Foto 8.1.5. Aspecto general del arenal.



Foto 8.1.6. Filas de captadores para regenerar la duna.



Foto 8.1.7. Resultado de la revegetación del frente dunar.

Conclusiones

Las obras de restauración dunar que utilizan sistemas de regeneración ecológicos necesitan, a diferencia de la obra civil, un tiempo a partir de la ejecución, durante el cual van actuando los procesos naturales. Por ello, en el momento de la finalización de las obras no se consideran completamente terminadas.

Estas técnicas, como la instalación de captadores de arena para lograr una estructura topográfica adecuada y la plantación de vegetación dunar para la fijación de sus superficies, utilizan los procesos naturales para conseguir su función. El viento transporta la arena que se sedimenta detrás de los captadores y la vegetación se va estableciendo hasta conseguir una cobertura que permita su fijación y equilibrio.

Por otro lado, las actuaciones de regeneración dunar deben ir acompañadas de sistemas de protección para evitar que la causa de su degradación vuelva a ocurrir (cerramientos) y para ayudar a las jóvenes plantas introducidas a establecerse correctamente mediante la estabilización de su superficie (captadores).

Además, necesitan un pequeño pero continuado mantenimiento, al menos durante los primeros años de su terminación, no sólo para la reparación de las estructuras de protección, como cerramientos, pasarelas o carteles que, por causas naturales o la acción vandálica humana suelen sufrir daños, sino también para la corrección del proceso de captación de arena y para la replantación de las zonas donde la vegetación no ha arraigado suficientemente, bien por la movilidad del substrato (enterramiento o erosión) bien por defectos en su establecimiento.

En el caso del sistema dunar de Liencres, la evolución global de las actuaciones realizadas se considera muy positiva, aunque pone de manifiesto la necesidad de un seguimiento de la restauración con el objetivo de observar comportamientos y evolución de las actuaciones realizadas y un mantenimiento periódico que asegure la efectividad de los elementos e infraestructuras.

Por otro lado, la respuesta de los sistemas dunares ante las obras de restauración no es siempre la misma, pues depende de múltiples factores como la

climatología, la presión turística u otros impactos que soporte, al balance sedimentario, etc. por lo cual tanto el seguimiento como el mantenimiento se consideran necesarios para llevar a cabo con éxito la restauración de los sistemas dunares.

8.2

8.2. El Saler

Introducción y caracterización

El proyecto de restauración se desarrolla a lo largo del tramo central de la barra que cierra la albufera de Valencia, en la denominada Devesa de El Saler, y en todo el tramo situado hacia el sur, incluyendo las playas de El Saler, Els Ferros-Garrofera, la Brava, la Malladeta y El Canyar, de norte a sur, hasta el campo de golf de El Saler, en una longitud total de unos 7 km.

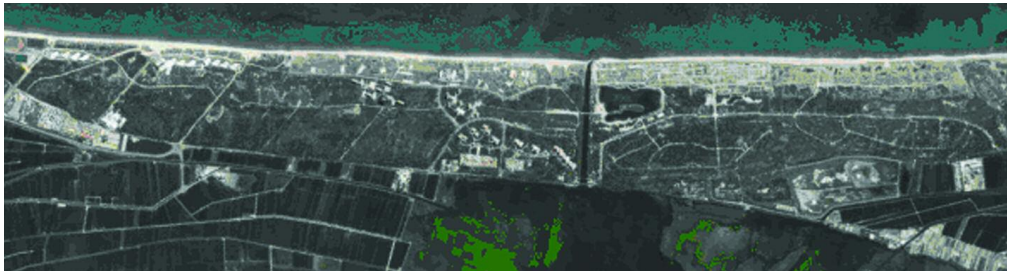


Foto 8.2.1. Sector costero restaurado.

Toda esta zona, de propiedad de la Corona primero, y desde 1873 del Patrimonio del Estado, pasa a titularidad del Ayuntamiento de Valencia en 1927. Son 3.144 ha de superficie entre la albufera y la Devesa y hasta ese momento, era una vasta extensión de bosque mediterráneo, zonas húmedas (malladas) y zonas dunares.

Problemática y situación de partida

Hacia 1960, un desafortunado plan urbanístico comienza su desarrollo, que se paraliza a raíz de la democratización de los ayuntamientos hacia 1979. A lo largo de este período, ya se habían destruido grandes superficies de terreno, habiendo sido el cordón dunar arrasado en el sentido literal de la palabra por allanamientos con maquinaria.

En primera línea de playa, una vez destruido el cordón dunar, se construyó un paseo marítimo a lo largo del sector costero. Las malladas habían sido rellenadas con la arena del cordón dunar y repobladas con eucaliptos. Una gran superficie del bosque mediterráneo se había deforestado para la construcción de muchos kilómetros de viales, aparcamientos y servicios, y se habían levantado cuarenta edificios de más de ocho alturas.

Actuaciones

A principos de los años 80 del pasado siglo, el Ayuntamiento de Valencia redacta un Plan Especial de Protección del Monte de la Devesa del Saler y crea un ente administrativo (la Oficina Técnica Devesa-Albufera, ODTA) al que encarga el establecimiento de objetivos y su desarrollo y ejecución para la restauración de la albufera y su devesa. En 1986 se crea el primer parque natural de la Comunidad Valenciana, el Parque Natural de la Albufera.

Desde principios de los años 80 también comenzaron los primeros experimentos con diversos sistemas de captadores de arenas y de reintroducción de la vegetación. Se ensayaron captadores de filas simples de caña, de haces de restos vegetales, mallas de plástico, entramados ortogonales de ramaje y por fin, entramados ortogonales con captadores realizados con *Spartina versicolor* armadas con cañas, método que resulta el más apropiado para este tipo de playas.

Además, se ensayaron distintos métodos de reintroducción de la vegetación dunar y de tratamientos para mejorar la fertilidad y estabilidad, como colchones bituminosos, con turba, con estiércol, con restos de posidonia, etc., llegando a la conclusión de que era mejor no utilizar nada, pues, si bien la colonización natural era más lenta, se obtuvo una mayor biodiversidad.



Foto 8.2.2. Proceso de montaje de los captadores de Spartina.

Tras más de 20 años de experiencias, la ODTA desarrolla una metodología de restauración de dunas de primera línea aplicable a otras zonas del mediterráneo. Esta metodología consta de tres pasos. El primero consiste en la restauración de la morfología dunar mediante la acumulación mecánica de la arena. A continuación, se estabiliza este depósito mediante las empalizadas de espartina y la plantación de especies dunares y por último, se adecua el área restaurada para uso público, cerrando temporalmente el área restaurada y mediante amplias campañas de información y educación ambiental se explica al ciudadano el motivo y finalidad de las actuaciones.



Foto 8.2.3. Aspecto del cordón dunar restaurado.

En cuanto a la restauración de la morfología dunar, a partir de las fotografías aéreas antiguas se realiza un análisis de la topografía primitiva, se calcula la disponibilidad de arena existente, se determina la morfología que se pretende obtener y se adapta al relieve actual.

Durante estos trabajos de restauración morfológica se vacían las malladas que habían sido rellenadas y se modela un nuevo perfil dunar asimétrico con una pendiente más suave a barlovento.



Foto 8.2.4. Detalle de la vegetación plantada entre los captadores.

En cuanto a la restauración vegetal, este proyecto ha desarrollado una metodología propia que se caracteriza por la gran biodiversidad conseguida, no sólo en los hábitats dunares, sino también en las malladas y en el bosque mediterráneo.

De acuerdo con la vegetación previamente existente, se han definido una serie de "módulos de repoblación" correspondientes a cada parte de la duna: embrionaria, zona de barlovento, cresta y zona de sotavento, en los que varían la composición y proporción de la vegetación introducida.



Foto 8.2.5. Otro detalle.

Entre las especies que se han conseguido introducir destacan las siguientes: *Cakile maritima, Calystegia soldanella, Elymus farctus, Euphorbia paralias, Otanthus maritimus, Polygonum maritimum, Lotus creticus, Medicago marina, Ammophila arenaria, Cyperus capitatus, Echinophora spinosa, Crucianella maritima, Eryngium maritimum, Malcolmia littorea, Sporobolus pungens, Ononis natrix y Pancratium maritimum*, entre otras.

Durante varias etapas, se han ido restaurando las diferentes zonas, demoliendo el paseo marítimo y la mayor parte de los viales, pozos y

alcantarillas y demás infraestructura urbanística, sustituyéndolos por la duna restaurada a lo largo de los 7 km de actuación.

Conclusiones

La restauración de las dunas de El Saler constituye uno de los primeros y mejor desarrollados ejemplos de este tipo de actividades en España. Además de por los aspectos urbanísticos, de desmontar una urbanización que estaba destruyendo todo un importante sistema dunar, humedal trasdunar y bosque mediterráneo, por los aspectos técnicos propios de la restauración, tales como las reconstrucciones topográficas, las labores de reintroducción de la vegetación y las de comunicación ciudadana.



Foto 8.2.6. Captación en la duna embrionaria.



Foto 8.2.7. Aspecto general.



Foto 8.2.8. Cierres realizados con cañizos.

Por otro lado, es un ejemplo en la coordinación entre las distintas administraciones que tienen competencias en este territorio, sin la cual, cualquier proyecto de esta envergadura no habría sido posible.

8.3

Enebrales

Introducción y caracterización

La playa y sistema dunar de Los Enebrales, situado al oeste de la localidad de Punta Umbría, se extiende sobre una longitud de 2.800 m y una anchura media de unos 250 m, de los que aproximadamente 50 corresponden a un sistema dunar activo y el resto se encuentra fijado con un pinar de repoblación (*Pinus pinea*). Todo el ámbito se encuentra protegido bajo la denominación de Paraje Natural de los Enebrales.

La playa alta está prácticamente desprovista de vegetación y, periódicamente, presenta una berma, en la mayor parte de su longitud de unos 50-100 cm de altura. La duna costera presenta una red de pasillos de deflación de origen antrópico que, en ocasiones, llegan a romper el cordón. La dinámica dunar actualmente presenta una clara tendencia regresiva derivada de la reducción del aporte del material sedimentario, probablemente incrementado por el efecto pantalla que la flecha de Nueva Umbría ejerce en este tramo de costa. La ladera de barlovento del cordón dunar presenta indicios de erosión marina, que se manifiesta en una pendiente muy elevada y brechas más o menos patentes en toda su longitud.

Hacia el interior el sistema dunar se caracteriza por la presencia de enebros (*Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa*), especie en peligro de extinción y sabinas *(Juniperus phoenicea subsp. turbinata*), además de otras especies arbustivas costeras características de los ecosistemas duna-

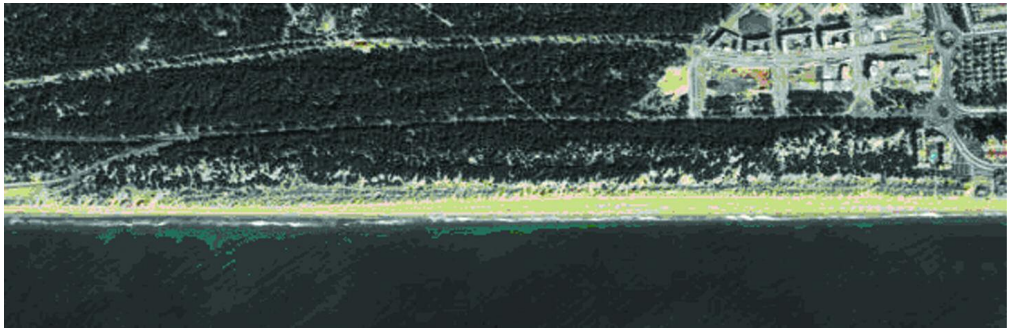


Foto 8.3.1. Vista aérea de la zona de estudio.



Foto 8.3.2. Aspecto general del cordón dunar de Los Enebrales.



Foto 8.3.3. Enebro costero (*Juniperus oxycedrus subsp macrocarpa*).



Foto 8.3.4. Sabina (*Juniperus phoenicea subsp turbinata*).

res de este sector litoral, como la camarina (*Corema album*), que en esta localidad encuentra su población más suroccidental de la Península, el jaguarzo (*Halimium halimifolium*) o el romero (*Rosmarinus officinalis*). Estas especies arbustivas se presentan formando pequeños rodales o como sotobosque del pinar de repoblación que fija el sistema dunar interno.

Problemática

La problemática de este sector costero se deriva de la erosión marina y de la retirada de la línea de costa hacia el interior, erosionando el pie de la duna y originando unas elevadas pendientes en la cara del cordón orientada al mar.

Como consecuencia, todo el frente dunar se encuentra en retroceso y, a lo largo de este sector costero, aparecen brechas y pasillos de deflación por los cuales, la arena es transportada hacia el interior.

Por otro lado, la gran presión turística que soporta y su falta de planificación hacen que estos procesos erosivos se vean incrementados, por la desestabilización que se produce al atravesar un gran número de personas el cordón dunar a través de estos pasillos de deflación.

Existe cierto número de pasarelas que atraviesan todo el pinar, pero que terminan justo antes del cordón dunar, por lo que los usuarios atraviesan a través de la red de caminos existentes.

Actuaciones

Las actuaciones realizadas para reducir el ritmo de degradación que sufría este tramo costero han tenido por objeto la disminución del impacto antrópico caracterizado, principalmente, por paso de visitantes y vehículos a través del cordón dunar, la protección del cordón dunar para intentar recuperar la dinámica de los procesos naturales y la colonización del sistema dunar por parte de la vegetación autóctona.

Se trata pues de unir las necesidades de utilización de la playa, sin agredir al entorno, con las de conservación y mantenimiento de la dinámica natural.

Las acciones llevadas a cabo en la playa de Los Enebrales han sido las siguientes:

- Instalación de captadores pasivos de arena.
- Plantación de especies dunares fijadoras de arena: barrón (*Ammophila arenaria*).
- Adecuación mediante pasarelas, de los accesos peatonales sobre las dunas hasta la playa, desde el lugar donde terminan las pasarelas ya existentes.
- Remodelación del perfil de la duna, mediante aporte de arena, en los lugares en los que la conexión de las pasarelas ya existentes con las pasarelas nuevas lo requerían.
- Instalación de un cerramiento de protección en las zonas plantadas y en las zonas que, aunque no hayan sido objeto de plantación, necesitan limitar la afluencia de visitantes.
- Eliminación de especies invasoras como la uña de gato (*Carpobrotus edulis*).
- Limpieza y retirada de residuos.
- Señalización mediante carteles y paneles informativos de la actuación y de la importancia de conservar los ecosistemas dunares.



Foto 8.3.5. Detalle de la erosión del frente dunar.



Foto 8.3.6. Detalle del frente erosionado.

Conclusiones

Aunque todavía es pronto para sacar conclusiones definitivas de esta actuación, en general, ha sido muy positiva, especialmente en cuanto al efecto de protección de los elementos tales como cerramientos y pasarelas. No obstante, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones.

La restauración del frente dunar de un tramo en acreción tiene un comportamiento muy diferente al de un tramo en erosión. En el primer caso, cuando los elementos de regeneración (captadores fundamentalmente) comienzan a producir sus efectos, se aprecia una elevación del terreno en las zonas donde se deposita la arena, con lo cual el riesgo de inundación del pie de la duna por ataque de temporales disminuye. Por otro lado, este efecto se incrementa cuando la vegetación comienza a arraigar y a ejercer su efecto de construcción de dunas.



Foto 8.3.7. Incipiente captación de arena en primera fila.



Foto 8.3.8. Detalle del establecimiento de la vegetación.



Foto 8.3.9. Detalle de pasarela sobre el cordón dunar.

En los tramos de costa sometidos a erosión marina, normalmente el efecto de los captadores es más lento que el propio avance del mar, por lo cual, es frecuente que los sistemas de captadores no sean lo suficientemente eficaces como para producir una elevación del terreno suficiente. Además, el establecimiento de la vegetación es mucho más lento y dificultoso, debido al ataque del oleaje.

Dado que normalmente no se contemplan obras de envergadura para evitar la erosión marina, que en general han demostrado su ineficacia, en las obras de restauración de tramos erosivos se debe tener en cuenta el retroceso implacable de la línea de costa.

Tratándose de fenómenos naturales (por supuesto, se debe limitar el impacto humano) es mejor adaptarse a la dinámica natural, huyendo de posiciones románticas e irreales.

En general, el gestor de las dunas tiene especial temor por los fenómenos erosivos, pero hay que tener en cuenta que no existe deposición si no hay previo una erosión y que si se evita la erosión en un tramo costero, aguas abajo, la deposición disminuye.

Cuando la línea de costa se retira, el mecanismo de transporte del frente dunar hacia el interior tiene lugar a través de las brechas y pasillos de deflación, por lo que en estos casos, las actuaciones de regeneración deben facilitar la migración hacia el interior. Para ello, lo más conveniente es promover, mediante captadores y plantaciones la formación de un nuevo frente dunar más retrasado.

En cualquier caso, es necesaria una labor de seguimiento a medio y largo plazo, para adecuar y ajustar las actuaciones proyectadas a las características propias y a la dinámica de cada zona.

8.4

El Espigón

Descripción

El sistema dunar de El Espigón tiene un origen antrópico; se ha formado, y continúa en la actualidad, por el efecto de interrupción de la deriva sedimentaria paralela a la costa que ejerce el dique Juan Carlos I. El dique se terminó de construir en 1981 para contener el flujo de arena y permitir el acceso del tráfico marítimo al Puerto de Huelva.

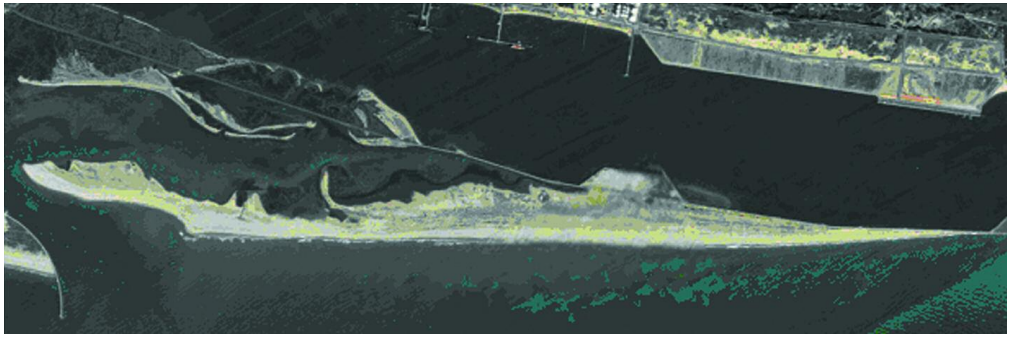


Foto 8.4.1. Aspecto del área de estudio.

El sistema dunar presenta unas dimensiones de unos 5.600 m de longitud por unos 150 m de anchura media, de los cuales, los 2.700 m occidentales se incluyen en el Paraje Natural Marismas del Odiel, y el resto es de titularidad del Puerto de Huelva. La playa es disipativa, con pendientes muy suaves y una extensa zona intermareal. El sistema dunar presenta una morfología muy plana, probablemente por la predominancia del proceso de deposición marina sobre la dinámica eólica.

Una de las características más importantes de esta playa es su rápido crecimiento debido al enorme volumen de arena que atrapa el espigón. El sistema dunar que se forma es de escasa potencia, siendo muy importante la transferencia de arenas hacia la ría interior. Presenta una escasa heterogeneidad ambiental lo cual, junto con su reciente origen, ha dado como resultado un sistema dunar pobre en especies. Sin embargo, la vegetación aparece siguiendo un gradiente hacia las zonas interiores relacionado con la cercanía al mar y la movilidad de las arenas, for-

mando las características bandas de vegetación de este tipo de ecosistemas. La vegetación de playa alta, donde la incidencia de la influencia marina es mayor y donde se acumulan restos orgánicos que el mar expulsa, está compuesta mayoritariamente por especies anuales de verano como la oruga de mar (*Cakile maritima*), barrilla pinchosa (*Salsola kali*), polígono marino (*Polygonum maritimum*), etc.



Foto 8.4.2. Aspecto del perfil dunar antes de las obras.



Foto 8.4.3. Detalle de la vegetación del frente dunar.



Foto 8.4.4. Apertura de la zanja para la instalación de los captadores.

Un poco más hacia el interior, donde la influencia marina es algo menor, se forma otra banda paralela, la duna embrionaria, de muy escasa altura y anchura, compuesta por la grama marina (*Elymus farctus*) y *Sporobolus pungens*. Tras ella, aparece un arenal con apenas relieve dominado por el barrón (*Ammophila arenaria*), la algodonosa (*Otanthus maritimus*), el cardo marino (*Eryngium maritimum*) etc.

En la zona más al interior el substrato está muy estabilizado, con un gran contenido en conchas. La vegetación se caracteriza por la dominancia de especies litorales psammófilas en las zonas más expuestas al mar y por un pastizal litoral adaptado a condiciones más estables con presencia de especies alóctonas como *Oenothera drummondii*, *Conyza albida* y la caña *Arundo donax*. En la playa alta del sector incluido en el Paraje Natural se localizan poblaciones importantes y áreas de cría de Charrancito (*Sterna albifrons*).

La cercanía a la ciudad de Huelva y la facilidad de acceso han dado como resultado una creciente presión turística para el uso balneario de la playa y para la pesca con caña. Como resultado del incremento de visitantes que atraviesan el sistema dunar hacia la playa, se han formado numerosas sendas que amenazan con la fragmentación y desestabilización del sistema.

Los objetivos planteados en el proyecto consistían, por tanto, en la formación de un nuevo relieve de cordón dunar y su fijación con vegetación, una protección del cordón frente al impacto del turismo y en instalar en la playa unas pasarelas que permitieran a los usuarios acceder con más comodidad y sin dañar la vegetación.



Foto 8.4.5. Pasarelas de acceso a la playa.

Actuaciones

Las actuaciones realizadas entre 2004 y 2005 se integran en dos grupos: obras de estabilización y regeneración de la cubierta vegetal y obras de protección del cordón dunar. La inversión total fue aproximadamente de 800.000 €. Se describen a continuación las actuaciones más importantes realizadas:

- Instalación de captadores pasivos de arena de materiales biodegradables (mimbre). Se instalaron 13.500 m.
- Plantación de especies dunares fijadoras de arena: barrón (*Ammophila arenaria*). (550.000 unidades).
- Adecuación de accesos peatonales (rampas y pasarelas), de acceso a la playa. Siete pasarelas con un total de 850 m.
- Señalización mediante carteles y paneles informativos de la actuación y de los ecosistemas dunares. Se instalaron siete carteles grandes y cincuenta pequeños.
- Cerramientos de las áreas restauradas, con una longitud total de unos 9.500 m.



Foto 8.4.6. Detalle de la captación de arena en las primeras fases.

Conclusiones

En la actualidad, a los dos años desde su ejecución, los objetivos perseguidos se consideran alcanzados ya que se ha formado un cordón dunar con cierto relieve, aunque más lentamente de lo que se esperaba, dado que el transporte eólico hacia el interior no es tan activo como en otras zonas. Las filas de captadores situadas más hacia el interior no reciben tanta arena como para construir un perfil dunar tan ancho, aunque de momento es pronto como para sacar conclusiones definitivas.

La vegetación plantada está bien establecida y la colonización natural recubre y enriquece de especies las parcelas protegidas con cerramientos. Éstos permanecen estables, no sufren enterramientos ni descalzamientos, al no



Foto 8.4.7. Otro detalle de la captación.



Foto 8.4.8. Aspecto del nuevo frente dunar con la vegetación establecida.

tener demasiados cambios el relieve y las pasarelas son utilizadas por la mayoría de los usuarios.

Tanto el conjunto de la obra, como sus detalles parciales se consideran bien realizados. Por otro lado, no se aprecia excesivo vandalismo, aunque se recomienda realizar un seguimiento de las actuaciones y un mínimo mantenimiento de las infraestructuras para evitar su deterioro y su funcionalidad. Por otro lado, es muy posible que durante el proceso de establecimiento de la vegetación y de estructuración del cordón dunar puedan aparecer fenómenos erosivos puntuales en el nuevo cordón dunar, lo cual es más sencillo y barato corregir cuando son incipientes que cuando ya son fenómenos extensos y generalizados.

9

Referencias bibliográficas

A

Akeroyd, J. 1997. Interspecific variation in European coastal plant species. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems.* Elsevier, 2c: 145-162.

Anderson, R.S., 1987. A theoretical model for Aeolian impact ripples. Sedimentology, 34, 943-956.

Andersen, U.V. 1993. Dispersal strategies of Danish seashore plants. Ecography 16: 289-298.

Asensi, A. & Diez, B. 1993. Dry coastal ecosystems of southeastern and eastern Spain. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems.* Elsevier, 2a: 363-368.

B

Bagnold, R.A., 1941. The Phisycs of Blown Sand and Desert Dunes. Chapman Hall, London, 265 pp.

Bagnold, R.A., 1956. The flow of cohesionless grains in fluids. Proceedings of the Royal Society, 249, 235-297.

Bañares, Á., G. Blanca, J. Güemes, J.C. Moreno & S. Ortiz (eds.)- (2004). Atlas y Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid. 1069 pp.

Barbour, MG (1978). Salt spray as a microenvironmental factor in the distribution of beach plants at Point Reyes, California. Oecologia, 32, 213-224.

Barbour, M.G., DeJong TM and Pavlik BM (1985). Marine beach and dune plant communities. In: Physiological ecology of North American plant communities. BF Chabot and HA Mooney (eds). Chapman and Hall, New York.

Barndorff-Nielsen, O., Dalsgaard, K., Halcreen, C. Kuhlman, H., Møller, J.T. and Schou, 1982. Variation in particle size distribution over small dune. Sedimentology, 29, 55-65.

Bauer, B.O. and Sherman, D.J., 1999. Coastal dune dynamics: problems and prospects. In: Goudie, A.S., Livingstone, I. and Stokes, S., Editors, 1999. *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*, Wiley, Chichester, pp. 71–104.

Belly, Y., 1964. Sand movement by wind. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Memo, 1, Addendum III, 24 pp.

Bird, E. C. F. (1990). Classification of European dune coasts. (In: Bakker, Th. W. & P. D. Jungerius, J. Klijn (eds.): Dunes of the European coasts, 15–24. Catena supplement 18. Cremlingen).

Blumberg, D.G. and Greeley, R., 1993. Field studies of aerodynamic roughness length. Journal of Arid Environmentst, 25, 39-48.

Bodere, J.C.; Cribb, R.; Curr, R.; Davies, P.; Hallegoouet, B.; Meur, C.; Piriou, N.; Williams, A. y Yoni, C. 1991. La gestion des milieux dunaires littoraux. Evaluation de leur vulnérabilité á partir d'une liste de contrôle. Etude de cas dans le sud du Pays de Galles et en Bretagne occidentale. *Norois*, 38, 151,279-298.

Boyce SG (1954). The salt spray community. Ecological Monographs, 24, 29-69.

Brown, A. C. y McLachlan, A., 1994. *Ecology of sandy shores*. Elsevier, Amsterdam.

Brown, J.F. 1997. Effects of experimental burial on survival, growth, and resource allocation of three species of dune plants. Journal of Ecology 85:151-158.

C

Cain ML, Subler S, Evans JP and Fortin M-J (1999). Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia*, 118, 397. 404.

Campos, J.C., Herrera, M., Biurrum, I., Loidi, J. 2004. The role of alien plants in the natural coastal vegetation in central-northern Spain. Biodiversity and Conservation 13: 2275–2293.

Carter, R.W.G. (1988): Coastal Environments. An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines. Academic Press.

Carter, R.W.G. 1990. The geomorphology of coastal dunes in Ireland. En: Bakker, Th. W., Jungerious, P.D. y Klijn, J.A. (eds), Dunes of European coasts; geomorphology-hydrology-soils. *Catena Supplement*, 18: 31-40.

Carter, R.W.G. 1991. Near future sea level impacts on coastal dunes landscapes. *Landscape Ecology*, 6 1/2, 29-39.

Carter, R.W.G. 1995. *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. 5th ed. Academic press, London.

Clark, J.S. 1986. Coastal forest tree populations in changing environment, SE Long Island, New York. *Ecological Monograph*, 56: 97-126.

Clark, R.G., and D. Shutler. 1999. Avian habitat selection: pattern from process in nest-site use by ducks. Ecology 80:272-287.

Cooke, R.U., Warren, A. y Goudie, A. 1993. Desert geomorphology. ECL Press, London.

Costa, C.S.B., Cordazzo, C.V. y Seelinger, U. 1996. Shore disturbance and dune plant distribution. Journal of Coastal Research 12: 133-140.

Costa, M. & Mansanet, J. 1981. Los ecosistemas dunares levantinos: la Dehesa de la Albufera de Valencia. Actas III Congr. OPTIMA. Anales Jard. Bot. Madrid 37: 277-299.

Crespo, M.B. & Manso, M.L. 1990. Notas sobre la vegetación de las dunas de Elche (Alicante). Ecología 4:67-88.

D

Dalton, D.A., Kramer S., Azios N, Fusaro S., Cahill E, Kennedy, C. 2004. Endophytic nitrogen fixation in dune grasses (Ammophila arenaria and Elymus mollis) from Oregon. Microbiology Ecology 49:469–479.

Daniels, R..C.; Gornotz, V.M.; Mehta, A.J.; Lee, S.C. y Cushman, R.M., 1992. Adapting to sea-level rise in the U.S. Southeast: The influence of built infraestructure and byophysical factors on the inundation of coastal areas. Oak Ridge National Laboratory.

Davis, M.A., Grime, J.P. and K.Thompson, 2000. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology* 88: 528–534.

Davy, A. J. y Figueroa, M. E. 1993. The colonization of strandlines. En: Miles, J. y Walton, D. W. H. (eds.) *Primary succession on land*. Blackwell, Oxford, 113-131.

Dech, J.P. y Maun, M.A. 2005. Zonation of vegetation along a burial gradient on the leeward slopes of Lake Huron sand dunes. *Canadian Journal of Botany* 83: 227–236.

Deshmukh, IK (1977). Fixation, accumulation and release of energy by *Ammophila arenaria* in a sand dune succession. In: Ecological processes in coastal environments in a sand dune succession. RL Jefferies and AJ Davy (eds). Blackwell Scientific Publications, London, 353-362.

Devesa Alcaraz, J.A. 2006. La protección de la flora vascular en España peninsular y Baleares . *Ecosistemas*. 2006/2.

Doing, H. 1985. Coastal fore-dunes zonation and succession in various parts of the world. *Vegetatio*, 61:65-75.

Dyer, K., 1986. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley, Chichester.

E

European Comision DG Environment 2003. Interpretation manual of European Union habitats EUR 25 - October 2003.

European Environmental Agency 2006. The changing faces of Europe's coastal areas. EEA Report nº6.

F

Flemming, C.A. y Townend, I.H., 1989. A coastal management database for East Anglia. *Coastal Zone*'89, 4092-4107.

Flor, G. (1980). Las dunas costeras de Cantabria: valores singulares geológicos. *Comunicaciones, 1ª Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*. 22 pp. Santander.

Flor, G. (1981). "Las dunas eólicas costeras de la playa de Xagó (Asturias)". *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 11, 61-71.

Flor, G. (1983). "Las formaciones dunares eólicas del litoral asturiano". *Rev. Astura*, nº 1. Oviedo.

Flor, G. (1992). Catalogación y tendencias de los procesos de erosión/sedimentación en los campos dunares de la costa de Galicia (NW de España). Thalassas, 10. 9-33.

Flor, G. (1998). Classification and characterization of eolian dunes in temperate rocky coast. The Spanish Peninsular Eolian Fields. (*En*: Soares de Carvalho, G., Veloso, F.& Taveira Pinto, F.: Dunas da zona costeira de Portugal. Eurocast Portugal, 29-42).

Flor, G. (2004). Geología Marina. Área de Estratigrafía y Sedimentología. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.

Folk, R. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.

Fryberger, S.G., 1979. Dune forms and wind regimes. In E.D. McKee (ed.), A study of global sand seas, 137-140, Unites States Geological Survey, Professional Paper 1052.

G

Gallego Fernández, J.B., García Mora, M.R. Ley Vega de Seoane, C. 2003. Restauración de Ecosistemas Dunares Costeros. En: Rey Benayas, J.M. Espigares, T. Nicolau, J.M. (eds.) Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Alcalá de Henares. Universidad de Alcalá de Henares.. Pag. 157-172.

Gallego Fernández, J.B., Muñoz Vallés, S. Dellafiore, C. 2006. Flora y Vegetación de la Flecha litoral de Nueva Umbría, Lepe-Huelva. Ayuntamiento de Lepe, 134 pp.

Gallego Fernández, J.B., Muñoz Vallés, S. Dellafiore, C. 2006b. Introduction of Exotic Plants Caused By Beach and Dune

Management. Proceeding of the Second International Conference on the Management of Coastal Recreational Resources-Beaches, Yaching and Coastal Ecoturism, Malta Gozo. Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics; Foundation for International Studies. Pag. 355-365.

García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, and A.T. Williams. 1998. The coastal area of SW Spain: between conservation and tourist development. Páginas 177-186 *en* J.L. Monsó de Prat, editor. Proceedings of the Four International Conference Littoral'98. Barcelona.

García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, y F. García Novo. 1999. Plant functional types in relation to foredune dynamics and the main coastal stresses. Journal of Vegetation Science 10: 27-34.

García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, y F. García Novo. 2000. Plant diversity as a suitable tool for coastal dune monitoring. Journal of Coastal Research 16:990-995.

García Mora, M.R., J.B. Gallego Fernández, A.T. Williams, y F. García Novo. 2001. A coastal dune vulnerability classification: SW Iberian Peninsula case study. Journal of Coastal Research 17:802-811.

García Novo, F., Ramírez Díaz, L. y Torres Martínez, A. 1975. *El sistema de dunas de Doñana*. Naturalia Hispánica, 5, ICONA, Madrid.

García Novo, F. 1976. Ecophysiological aspects of the distribution of Elymus arenarius and Cakile maritima on the dunes of Tents-Muir Point.(Scotland). *Oecol.Plant.* 11(1):13-24.

García Novo, F. 1979. The ecology of vegetation of the dunes in Doñana National Park (South-West Spain). En: Jefferies, R.L. y Davy A.J. (eds), *Ecological processes in coastal environments*. Blackwell, Oxford, 571-592.

García Novo, F. 1990. Origin of the Doñana ecosystem. En: *Doñana National Park*. ICONA, Madrid, 199-205.

García Novo, F. 1997. The Ecosystems of Doñana National Park. En: García Novo, F., Crawford, R.M.M. y Diaz Barradas, M.C. (eds.) *The ecology and conservation of European dunes*. Univ. Sevilla. Sevilla, 97-116.

García Novo, F. y Merino, J., 1993. Dry coastal ecosystems of southwestern Spain. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems.* Elsevier, 2a: 349-362.

García Novo, F. y Merino, J., 1997. Pattern and proccess in the dune system of the Doñana National Park. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems.* Elsevier, 2c: 453-468.

García Novo, F., Crawford, R.M.M. y Díaz Barradas, M.C. 1997. The ecology and conservation of European dunes. Universidad de Sevilla. Sevilla.

García Novo, F., Maria Cruz Diaz Antunez-Barradas, Maria Zunzunegui Gonzalez, Juan Bautista Gallego Fernandez, Maria Rosario Garcia Mora:
Plant Functional Types in Coastal Dune Habitats. Coastal Dunes, Ecology and Conservation. Berlín, Alemania. Springer. Vol. 1. 2004. Pag. 155-169. ISBN: 3-540-40829-0.

García Novo, F., Marín Cabrera, C. 2005. Doñana: Agua y Biosfera. Madrid, España. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente. 353 pp.

Gillette, D.A. and Stockton, P.H. 1989. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces. Journal of Geophysical Research 94(D10):12885-12893.

Goldsmith, V. 1977. Coastal processes and resulting forms of sediment accumulation: Currituck Spit, Virginia/North Carolina. *Spec. Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering Nº 143. Virginia Inst. of Marine Science*. Gloucester.

Goldsmith, V. (1985). Coastal dunes. (In: Davis, R. A. (ed.), Coastal Sedimentary Environments, 2nd edn. Springer Verlag, New York, 171-236).

Gómez Campo, C. (1987). *Libro Rojo de especies vegetales amenazadas de España peninsular e Islas Baleares*. ICONA. Madrid.

Gornitz, V. y Kanciruk, P., 1989. Assessment of global coastal hazards from sea level rise. *Coastal Zone'89*, 1345-1359.

Gornitz, V., 1990. Vulnerability of the East coast, USA to future sea level rise. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 9: 201-237.

Gornitz, V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Paleography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), 89: 379-398.

Granados Corona, M.; Martín Vicente, A.& García Novo, F.; (1988). *Long term vegetation changes on the stabilized dunes of Doñana National Park (SW Spain). Vegetatio 75:73-80*.

Granados Corona, M.; Martín Vicente, A.; Fernández Alés, R. & García Novo, F.; (1984). *Étude diachronique d´un ecosysteme a longe échelle. La pinède de Marismillas (Parc National de Doñana)*. Mélanges de la Casa de Velazquez XX, pp:393-481.

Greeley, R., Iversen, J.D., Pollack, J.B., Udovich, N. and White, B.R., 1974. Wind tunnel studies of martian Aeolian processes. Proc. of the Royal Society of London, 341, 331-360.

Greeley, R., Iversen, J.D., 1987. Measurements of wind friction speeds over lava surfaces and assessment of sediment transport. Geophysical Research Letters, 14, 925-928.

H

Hardisty, J. and Whitehouse, R.J.S., 1988a. Evidence for a new sand transport process from experiments on Saharan dunes. Nature, 332, 532-534.

Hardisty, J. and Whitehouse, R.J.S., 1988b. Effect of bed slope on desert sand transport. Nature, 334, 302.

Harris D and Davy AJ (1988) Carbon and nutrient allocation in *Elymus farctus* seedlings after burial with sand. *Annals of Botany,* 61, 147-157.

Harte, J.M. and Pammenter, N.W., 1983. Leaf nutrient content in relation to senescence in the coastal sand dune pioneer Scaevola thunbergii Eckl. & Zeyh. *South African Journal of Science* 79: 420-422.

Heinz III Center for Science, Economics and the Environment. 2000. *The Hidden Costs of Coastal Hazards. Implications for Risk Assessment and Mitigation.* USA: Island Press.

Hesp, P.A. y Short, A. 1980. Dune forms of the Younghusband Peninsula, SE South Australia. Proceeding of the Conference on Aeolian Landscapes in the semiarid region of SouthEastern Australia, Australian Society of Soil Science, Riverina Branch, 65-66.

Hesp, P.A. 1984. Foredune formation in Southeast Australia. En: Thom, B.G. (ed.), Coastal Geomorphology in Australia. Sydney: Sydney Academic, 69-97.

Hesp, P.A. 1986. A review of coastal and desert dunes. En Structure and function of sand dune ecosystems. (ed. Van der Merwe, A, MacLachlan y Hesp). Univ. Port Elizabeth, Institute for Coastal Research Report 8:18.21.

Hesp, P.A. 1988. Foredune morphology, dynamics and structures. Journal of Sediment Geol Special Issue: Aeolian

Sediments 55:17-41.

Hesp, P.A. 1990. A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes. Proc. R. Soc. Edin B-BI :96 181-202.

Hesp, P.A. 1991. Ecological processes and plant adaptations on coastal dunes. Journal of Arid Environment 21 (2): 165-191.

Hesp, P.A. 2002. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. Geomorphology 48:245-268.

Hesp, P.A. y Martínez, M.L. 2007. Disturbance proceses and dynamics in coastal dunes. En Johnson, E.A. y Miyanishi, K (eds.) Plant disturbance ecology: the process and the response. Elsevier, pp. 215-247.

Hobbs, R.J.; Gimingham, C.H. y Band, W.T. 1983. The effects of planting technique on the growth of Ammophila arenaria (L.) Link and Leymus arenarius (L.) Hochst. *Journal of Applied Ecology* 20:659-672.

Hotta, S., Kubota, S., Katori, S. and Horikawa, K., 1984. Sand transport by wind on a wet sand surface. Coastal Engineering – 1984, 1265-1281.

Howard, A.D., 1977. Effect of slope on the threshold of motion and its application to orientation of wind ripples. Geological Society of America Bulletin, 88, 853-856.

Hsu, S.A., 1974. Computing eolian sand transport from routine weather data. Proc. 14th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 1319-1326.

Hughes, P.; Brundrit, G.B. y Searson, S., 1992. The vulnerability of Walvis Bay to rising sea levels, *Journal of Coastal Research*, 8: 868-881.

Hunter, R.E., Richmon, B.M. and Alpha, T.R., 1983. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon Coast. Geology Society of America Bulletin, 94, 1450-1465.

I

Izco, J. 1993. Dry coastal ecosystems of northern and northwestern Spain. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a: 329-340.

Izco, J. Amigo, J. & García-San León, D. 2000. Análisis y clasificación de la vegetación de Galicia (España), II. La vegetación herbácea *Lazaroa* 21: 25-50.

K

Kawamura, R., 1951. Study of sand movement by wind. Institute of Science and Technology, Tokyo, Report 5, 3-4 Tokyo, Japan, 95-112.

Ketchum, B.H. (ed.) 1972. The Water's Edge: Critical Problems of the Coastal Zone. MIT Press, Boston.

Kith y Tasara, M. 1946. El problema de las dunas del SO de España. Revista de Montes 11: 414-419.

Klijn, J.A. 1981. Nederlandse kustduinen. Geomorfologie en bodems (The Dutch coastal dunes. Geomorphology and soils). Doctoral thesis, Landbouwhogeschool te Wageningen, Centrum voor Landbouwpublikaties en landbouwdocumentatie, Wageningen, 188 pp. (in Dutch).

Klijn, J.A. 1990. Dune forming factors in a geographical context. In: Bakker, Th.W.M., Jungerius, P.D. and Klijn, J.A. (eds), Dunes of the European coasts, Catena, Supplement 18:1-14.

Knutson, P.L. 1978. Planting guidelines for dune creation and stabilization. In: Coastal Zone. *Proccedings of the Symposium of Technical, Environmental, Socioeconomic and regulatory Aspects of Coastal zone Management*. Pp. 762-779. ASCE, San Francisco, CA.

Kocurek, G., Townsley, M., Yeh, E., Havholm, K. and Sweet, M.L., 1992. Dune and dunefield development on Padre Island, Texas, with implications for interdune deposition and water-table-controlled accumulation. Journal of Sedimentary Petrology, 62, 622-635.

Kumler, M.L. 1997. Critical environmental factors in dry coastal ecosystems. In: van der Maarel, E. (ed.) *Dry coastal ecosystems. General aspects*, pp. 387-409. Elsevier, Amsterdam.

L

Lancaster, N., 1995. Geomorphology of desert dunes. Routledge, London, 290 pp.

Lettau, K. and Lettau, H.H., 1978. Experimental and micro-meteorological field studies on dune migration. In K. Lettau and H.H. Lettau (eds.), Exploring the World's Driest Climate, 110-147. University of Wisconsin, Madison, Institute for Environmental Studies.

Loriente Escallada, E. 1974. Vegetación y Flora de las dunas de la provincia de Santander. Institución Cultural de Cantabria, CSIC. Instituto de Ciencias Físico- Químicas y Naturales "Torres Quevedo". Diputación Provincial de Santander. 287 pags., 8 láms. Santander.

Lubke, RA. (1983). A survey of the coastal vegetation near Port Alfred, Eastern Cape. Bothalia, 14, 725-738.

M

Mack, M.C. & D'Antonio, C.M. (1998). Impacts of biological invasions on disturbance regimes. *Trends in Ecology and Evolution* 3: 195–198.

Marshall, J.K., 1971. Drag measurements in roughness arrays of varying densities and distribution. Agricultural Meteorology, 8, 269-292.

Martínez ML and Moreno-Casasola P (1996). Effects of burial by sand on seedling growth and survival in six tropical sand dune species from the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, 12(2), 406-419.

Martínez, ML. and Psuty, N. (eds).2004. *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.

Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., García-Franco, J.G., Moctezuma, C., Jiménez, C.D. 2006. Coastal dune vulnerability along the Gulf of México. *Environmental Conservation* 33(2): (en prensa).

Martínez Vázquez, M.L., Gallego Fernández, J.B., García Franco, J., Moctezuma, C, JiménezC.D. 2006. Assessment of Coastal Dune Vulnerability to Natural and Anthropogenic Disturbances Along the Gulf of Mexico. Environmental Conservation : 33 :109-117.

Maun, M.A. 1998. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. Canadian Journal of Botany 76: 713.738.

Maun, M.A. 2004. Burial of plants as a selective force in sand dunes. En (Martínez, M.L. y Psuty, N.P. eds.) Coastal dunes: ecology and conservation. Springer. Pp. 119-135.

McEwan, I.K. and Willets, B.B., 1991. Numerical model of the saltation cloud. Acta Mechanica, Supplement 1, 53-56.

McEwan, I.K, 1993. Bagnold knit: a physical feature of a wind velocity profile modified by blown sand?. Earth Surface Processes and Landforms, 18, 145-156.

McKee, E.D., 1979a. Introduction to a study of global sand seas. In E.D. McKee (ed.), A study of global sand seas, 3-19, Unites States Geological Survey, Professional Paper 1052.

McKenna-Newman, C. and Nickling, W.G., 1989. A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind. Canadian Journal of Soil Science, 69, 79-96.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*.Island Press, Washington, DC.

Ministerio de Medio Ambiente 2005. Los tipos de hábitat de interés comunitario de España: guía básica. Organismo Autónomo de Parques Nacionales 11/2005. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente 2006. Catálogo Nacional de Especies Amenazadas (1990-2006). Dirección General para la Biodiversidad.

Moreno-Casasola, P. 1986. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. Vegetatio 65: 67-76.

Morrison, R.G. and G.A. Yarranton. 1974. Vegetational heterogeneity during a primary sand dune succession. Can. J. Bot. 52:397-410. Morrison, R.G. and G.A. Yarranton. 1974. Vegetational heterogeneity during a primary sand dune succession. Can. J. Bot. 52:397-410.

Muñoz Reinoso, J.C. 2004. Diversity of Maritime Juniper Woodlands. Forest Ecology and Management,192: 267-276.

Muñoz Vallés, S., Gallego Fernández, J.B. y Dellafiore, C. 2005. *Foredune fragmentation and tourist pressure in two Natural Places in the Coast of Huelva, SW Spain*. En: Proceeding of International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean, Tavira (Portugal).

Muñoz-Reinoso, J. C. 2003. *Juniperus oxycedrus ssp. macrocarpa* in SW Spain: Ecology and conservation problems. Journal of Coastal Conservation 9: 113-122.

Musick, H.B.; Gillette, D.A. 1990. Field evaluation of relationships between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion. Land Degradation and Rehabilitation 2(2):87-94.

N

Nickling, W.G. and Wolfe, S.A., 1994. The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa. Journal of Arid Environments, 28, 13-30.

Nordstrom, K.F. y Arens, S.M. 1998. The role of human actions in evolution and management of foredunes in the Netherlands and New Jersey, USA. *Journal of Coastal Conservation* 4:169-180.

Nordstrom, K. F. 2000. Beaches and dunes of developed coasts - Cambridge University Press, Cambridge, 338 pp.

O

O'Brien, M.P. and Rindlaub B.D.,1936. The transportation of sand by wind. Civil Engineering, 6, 325-327.

Oostings HJ and Billings WD (1942). Factors effecting vegetational zonation on coastal dunes. Ecology, 23, 131-142.

Orians, G.H. 1975. Diversidad, estabilidad y madurez en los ecosistemas naturales. En: W.H. van Dobben & R.H. Lowe-

McConnell (Eds.): Conceptos unificadores en ecología. Blume, Barcelona: 174-189.
Orians, G.H. 1980. Diversidad, estabilidad y madurez en ecosistemas naturales. Páginas 174-189, en W.H. van Dobben, y R.H. Lowe-McConnel, editores. Conceptos unificadores en Ecología. Blume, Barcelona.
Owen, P. R., 1964. Saltation of uniform grains in air. Journal of Fluid Mechanics, 20, 225-242.

P

Packham, J.R. y Willis, A.J. 1997. Ecology of dunes, salt marsh and shingle. Chapman & Hall, Londres, 235 pp.
Pemasada, M.A. and Lovell, P.H., 1974. The mineral nutrition of some dune annuals. *Journal of Ecology* 62, 647-657.
Pimm, S.L. 1991. *The balance of nature?* University of Chicago Press. Chicago.
Pipió i Gelabert, H. 1988. Las dunas del golfo de Roses. Catalunya Rural i Agrària 47:22-23 y 28-30.
Psuty, N.P. (Ed), 1988. Dune/Beach Interaction. J. Coastal Res. Special Issue Nº 3, 1-136. CERF, Charloteville, Virginia.
Psuty, N.P. (2004). The coastal foredune: a morphological basis for regional coastal dune development. In: *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, ed. M.L. Mart´›nez & N. Psuty, pp. 11–27. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
Pye, K. 1983. Coastal dunes. Progress in Physical Geography 7:531-557.
Pye, K. and Tsoar, H., 1990. Aeolian sand and sand dunes, Unwin Hyman, London, 396.

Q

Quelennec, R.E., 1989. The Corine Coastal Erosion Project: identification of coastal erosion problems and data base on the littoral environment of eleven European countries. *Coastal Zone'89*, 4594-4601.

R

Ramírez Caro, J.L., J.J. Muñoz Pérez, y C. Ley Vega de Seoane. 1998. Restauración de ecosistemas dunares. Páginas 309-313, en J.L. Monsó de Prat, editor. Proceedings of the Four International Conference Littoral'98. Barcelona.
Randall, R.E. & Scott, G.A.M. 1997. Communities of sand and shingle beaches. In: van der Maarel, E. (ed.) *Dry coastal ecosystems. General aspects*, pp. 263-274. Elsevier, Amsterdam.
Ranwell, D. 1958. Movement of vegetated sand dunes at Newborough Warren, Anglesey. J. Ecol. 46: 83.100.
Ranwell, D.S. 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. Chapman and Hall, Londres. 258p.
Ranwell, D.S. y Board, R., 1986. *Coast dune management guide*. Institute of Terrestrial Ecology, NERC, Norwich.
Ridley, H.N. 1930. The dispersal of plants throughout the world. L Reeve, Kent, Reino Unido.
Rivas-Martínez, S., Costa, M., Castroviejo, S. & Valdés E. 1980. Vegetación de Doñana (Huelva, España) *Lazaroa* 2: 5-189.
Rivas-Martínez, S., Fernández-González, F., Loidi, J., Lousã, M. & Penas, A. 2001. Syntaxonomical checklist of vascular plant communities of Spain and Portugal to association level. *Itinera Geobotanica* 14: 5-341 (2001).
Rodríguez-Echeverría, C. & Freitas, H. 2006. Diversity of AMF associated with Ammophila arenaria ssp.arundinacea in Portuguese sand dunes Mycorrhiza 16:543–552.

Rozema JP, Bijwaard G., Prast G. and Broekman R. (1985). Ecophysiological adaptations of coastal halophytes from foredunes and salt marshes. Vegetatio, 62, 499-521.

S

Salman, A.H.P.M., y M. Kooijman. 1998. Loss and decline of coastal habitats. EUCC, Leiden.

Serrano, L., y L. Serrano. 1996. Influence of groundwater exploitation for Urban water supply on temporary ponds from the Doñana National Park (SW Spain). Journal of Environmental Management 46: 229- 238.

Sharp, R.P. 1963. Wind ripples. The Journal of Geology 71(5):617-636.

Sharp, R.P., 1964. Wind ripples. Journal of Geology, 71, 617-636.

Sherman, D.J. y Bauer, B.O. 1993. Dynamics of beach dune systems. Progress in Physical Geography 17:413-447.

Sherman, D.J. 1995; Namikas, S.L. . A review of the effects of surface moisture content on aeolian sand transport. In: Tchakerian, V.P. (ed), Desert aeolian processes, London: Chapman and Hall, pp. 269-294.

Short, A.D., y P.A. Hesp. 1982. Wave, beach and dune interaction in southeastern Australia. Marine Geology 48:259-284.

Silván, F. & Campos, J.A. 2002. Estudio de la flora vascular amenazada de los arenales de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Gobierno Vasco.

Sobrino, E., Sanz-Elorza, M., Dana, E., and A. González Moreno, 2002. Invasibility of a coastal strip in NE Spain by alien plants. *Journal of Vegetation Science* 13:585-594.

Stockton, P.H. and Gillette, D.A., 1990. Field measurements of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces. Land Degradation and Rehabilitation, 2, 77-86.

T

Tsoar, H., 1983a. Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) dune. Sedimentology, 30,567-578.

Tsoar, H. 2001. Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation. En N.J. Balmforth, A. Provenzale (eds.) Geomorphological Fluid Mechanics, 582. pp.403-429. Springer, Berlín.

Tsoar, H. 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 357: 50-56.

V

van der Laan, D.; van Tongeren, O.F.R., van der Putten, W.H. y Veenbaas, G. 1997. Vegetation development in coastal foredunes in relation to methods of establishing marram grass (*Ammophila arenaria*). *Journal of Coastal Conservation* 3:179-190.

van der Maarel, E. 1997. Dry coastal ecosystems: scope and historical significance. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), *Ecosystems of the world: Dry coastal ecosystems*. Elsevier, 2a: 1-6.

van der Meulen, F. and A.H.P.M. Salman, 1996. Management of Mediterranean coastal dunes. *Ocean & Coastal Management* 30:177-195.

van der Putten, W.H. 1990. Establishment and management of Ammophila arenaria (marram grass) on artificial coastal foredunes in the Netherlands. In: Davison-Arnott, R. (ed.) *Proccedings Canadian symposium on Coastal sand dunes*, pp. 367-387. Associate Committee on Shorelines, National Research Council and Guelph University.

van der Putten, W.H. y Kloosterman, E.H. 1991. Large-scale establishment of Ammophila arenaria and quantitative assessment by remote sensing. *Journal of Coastal Research* 7:1181-1194.

van der Putten, W.H. y Peters, B.A.M. 1995. Possibilities for management of coastal foredunes with deteriorated stands of Ammophila arenaria (marram grass). *Journal of Coastal Conservation* 1:29-39.

van der Valk, AG. (1974). The environmental factors controlling foredune plant communities in Cape Hatteras National Seashore, *Ecology*, 55, 1349-1358.

VV.AA. 2000. Lista Roja de la Flora Vascular Española (valoración según categorías UICN). Conservación Vegetal 6 (extra): 11-38.

W

White, B.R., 1979. Soil transport by winds on Mars. Journal of Geophysical Research, 84, 4643-5651.

Williams, A.T., J. Alverinho-Dias, F. García Novo, M.R. García Mora, R. Curr, y A. Pereira. 2001. Integrated coastal dune management: checklist. Continental Shell Research 21: 1937-1960.

Williams, A.T., P. Davies, J. Alverinho, A. Pereira, M.R. García Mora, y M. Tejada. 1994. A re-evaluation of dune vulnerability checklist parameters. GAIA, Revista de Geosciencias 8:179-182.

Williams, A.T., P. Davies, R. C. Curr, A. Koh, J.C. Bodere, B. Hallegouet, C. Meur, y C. Yoni. 1993. A checklist assessment of dune vulnerability and protection in Devon and Cornwall, UK. Coastal Zone'93: 3394-3408.

Willians, G., 1964. Some aspects of the eolian saltation load. Sedimentology, 3, 257-287.

Wasson R.J. and Hyde, R., 1983b. Factors determining desert dune type. Nature, 304, 337-339.

Y

Yaun T, Maun MA and Hopkins WG (1993). Effects of sand accretion on photosynthesis, leaf-water potential and morphology of two dune grasses. Functional Ecology, 7, 676-682.

Yura H, Ogura A (2006). Sandblasting as a possible factor controlling the distribution of plants on a coastal dune system. Plant Ecology 185:199–208.

Z

Zingg, A.W., (1952). Wind tunel studies of the movement of sedimentary material. Proc. 5th Hydraulics Conf., pp. 111-135.

Anexo. Relación de recursos gráficos

Capítulo 2. Apartado 2.2. **Página**

Figuras

- Figura 2.2.1. Zonación y elementos del perfil de playa. 22
- Figura 2.2.2. El perfil disipativo. 25
- Figura 2.2.3. El perfil reflejante. 25
- Figura 2.2.4. Formas en planta de escala media. 26
- Figura 2.2.5. Formas en planta de gran escala. 26

Tablas

- Tabla 2.2.1. Definiciones sobre la morfología del perfil. 23
- Tabla 2.2.2. Formas en planta de las playas. 27
- Tabla 2.2.3. Escalas espaciales y temporales típicas de algunos cambios morfológicos de las playas. 28
- Tabla 2.2.4. Modelos de evolución de playas. (Cont.) Modelos de equilibrio de playas. 32-33

Fotos

- Foto 2.2.1. Playa disipativa: Playa de Berria (Cantabria). 25
- Foto 2.2.2. Beach cusps y rotura del oleaje en una playa reflejante en pleamar. 25
- Foto 2.2.3. Erosión de pie de duna en un campo dunar en retroceso. Somo (Cantabria). 29
- Foto 2.2.4. Campo dunar en equilibrio. Liencres (Cantabria). 29
- Foto 2.2.5. Campo dunar progradante. Espigón de Huelva. 29

Capítulo 2. Apartado 2.3.

Figuras

- Figura 2.3.1. Morfología y terminología de una duna transversal simple. 38
- Figura 2.3.2. Diversas tipologías de dunas costeras. (Flor, 2004). 39
- Figura 2.3.3. Corte transversal típico de un sistema dunar costero. 41
- Figura 2.3.4. Tipos principales de dunas. Modificada de McKee (1979). Flechas: Vientos dominantes. 44
- Figura 2.3.5. Criterio de clasificación de los frentes dunares costeros en base al aporte sedimentario (Modificada de Carter, 1990). 47
- Figura 2.3.6. Clasificación de los frentes dunares costeros propuesta por Short y Hesp (1982). 48
- Figura 2.3.7. Tipos de dunas costeras. Bird, E.C.F. (1990). 50
- Figura 2.3.8. Etapas de la iniciación de dunas. Modificada de Kocurek *et al.,* 1992. 52

Tablas

- Tabla 2.3.1. Clasificación de dunas costeras. Se mantienen la mayor parte de las denominaciones clásicas sobre los tipos de dunas existentes en la literatura. Flor (2004). 49

Fotos **Página**
• Foto 2.3.1. Anteduna parcialmente estabilizada por barrón. 41
• Foto 2.3.2. Formación de una duna parabólica a partir de una depresión o casquete eólico. 46

Capítulo 2. Apartado 2.4.
Tablas
• Tabla 2.4.1. Terminología de la estadística gráfica de la clasificación y el sesgo de las arenas. Fuente: Folk and Ward, 1957. 56
• Tabla 2.4.2. Funciones de densidad más utilizadas para la distribución del tamaño del grano en dunas. 57

Capítulo 2. Apartado 2.5.
Figuras
• Figura 2.5.1. Relación entre el flujo de masa de sedimento y el contenido de humedad W. Modificada de Hotta *et al.*, 1984. 67
• Figura 2.5.2. Relación entre la relación de tensión tangencial, R, y la cobertura lateral de vegetación, Lc. Modificada de N. Lancaster, 1995. (después de Musick and Gillette, 1990). 69
• Figura 2.5.3. Relación entre el flujo de masa de sedimento y la pendiente. Modificada de Hardisty and Whitehouse (1988a). 71

Tablas
• Tabla 2.5.1. Valores típicos de la longitud de rugosidad de varias superficies. Fuente: Blumberg and Greeley, 1993. 59
• Tabla 2.5.2. Modos de transporte eólico. 59
• Tabla 2.5.3. Factores que influyen en la velocidad de corte de inicio de movimiento. 63
• Tabla 2.5.4. Formulaciones de transporte de arena en dunas. 65

Fotos
• Foto 2.5.1. Ripples de viento en una duna. 72

Capítulo 3
Figuras
• Figura 3.1. Gradientes abióticos en dunas costeras (modificado de Carter, 1988 y Brown & McLachlan, 1994). 77
• Figura 3.2. Sectorización transversal de un sistema dunar (modificado de van der Maarel, 1997). 87
• Figura 3.3. Zonación de la vegetación del sistema playa-primer cordón dunar en sectores de costa progradantes (Modificado de Doing, 1985). 87

Tablas
• Tabla 3.1. Factores ambientales y adaptaciones de las plantas en el sistema playa – primer cordón dunar (Modificada de Hesp, 1991). 79
• Tabla 3.2. Principales características y especies de los tipos funcionales de plantas de sistemas costeros activos del Golfo de Cádiz (modificado de García Mora *et al.*, 1999). 85

Página

- Tabla 3.3. Relación de especies de plantas de los sistemas dunares costeros activos de España. Elaborado a partir de Asensi, A. & Diez, B. (1993); Crespo y Manso (1990); Gallego Fernández *et al.*, (2006); Izco (1993); Izco, Amigo & García-San León (2000); Loriente Escallada (1974); Rivas Martínez *et al.*, (1980). La presencia de especies en las costas de Cataluña proceden de inventarios recogidos en el Banco de Datos de Biodiversidad de Cataluña (BDBC-Departamento de Medio Ambiente). 89-90
- Tabla 3.4. Catálogo nacional y catálogos autonómicos de especies de flora amenazada. 99
- Tabla 3.5. Figuras de protección de la Ley 4/89 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres. 100
- Tabla 3.6. Especies de flora dunar protegida por la legislación estatal y autonómica. (Categorías de protección: 1:Peligro de Extinción; 2:Sensible a la alteración de su hábitat; 3:Vulnerable; 4: De interés especial). 101
- Tabla 3.7. Especies exóticas registradas en dunas costeras activas en diferentes estudios realizados en el País Vasco y Andalucía (Campos *et al.*, 2004; Gallego Fernández *et al.*, 2006). 109

Fotos

- Foto 3.1. Coalescencia de montículos formados por la vegetación pionera que darán lugar a una duna embrionaria. 75
- Foto 3.2. Campo de nebkas que no dará lugar a la formación de un cordón dunar continuo. 75
- Foto 3.3. En primer término, primer cordón dunar costero dominado por *Ammophila arenaria*, continuando hacia el mar con una duna embrionaria, con *A. arenaria* y *Elymus farctus*, y una banda de montículos efímeros formados por *Salsola kali* y *Cakile* marítima. Playa de Nueva Umbría, Lepe (Huelva). 76
- Foto 3.4. Vegetación de playa seca formada por especies anuales como *Salsola kali* y *Cakile marítima.* 76
- Foto 3.5. *Ammophila arenaria* y *Euphorbia paralias* en dunas con gran aporte de arena, Valdevaqueros, Tarifa (Cádiz). 82
- Foto 3.6. Efectos de un temporal sobre la duna costera. Eliminación de vegetación y exposición de sistemas radicales de las plantas. En este caso, bulbos de *Pancratium maritimum*, que pueden ser dispersados por el mar a otras zonas de la costa. 83
- Foto 3.7. Semillas de *Pancratium maritimum* germinando en la playa seca tras ser transportadas por el mar. 83
- Foto 3.8. *Carpobrotus edulis*, especie exótica invasora sudafricana. 106
- Foto 3.9. *Oenothera drumondii,* especie exótica invasora americana. 106
- Foto 3.10. Ajardinamiento con especies exóticas en Tres Piedras. Chipiona (Cádiz). 106
- Foto 3.11. *Opuntia tuna* (chumbera) sobre dunas. 107

Cuadros

- Cuadro 3.1. Vegetación de dunas costeras progradantes. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005). 93
- Cuadro 3.2. Vegetación de dunas costeras estables. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005). 94
- Cuadro 3.3. Vegetación de dunas costeras erosivas. Sistema dunar Flecha litoral de El Rompido, Lepe-Huelva (Muñoz Vallés & Gallego Fernández, 2005). 95
- Cuadro 3.4. Comunidades fitosociológicas descritas en el sistema playa alta-primer cordón dunar de las dunas coste-

ras españolas (a partir de Rivas Martínez *et al.*, 2001). 97-98
• Cuadro 3.5. Hábitats naturales de dunas costeras recogidos en la Directiva 92/43/CEE existentes en España (*hábitats naturales prioritarios). 103
• Cuadro 3.6. Breve descripción los tipos de hábitats correspondientes a dunas activas y dunas activas que fueron fijadas con plantaciones de pinos. 103

Capítulo 4

Figuras

• Figura 4.1. Plantación de pinos piñoneros sobre las dunas realizada en 1905 en Enebrales de Punta Umbría (Huelva). 115

Fotos

• Foto 4.1. Yacimiento romano de Baelo Claudia en la Ensenada de Bolonia, Tarifa (Cádiz). 111
• Foto 4.2. Extracción extensiva de arenas en las dunas de Guadalquitón (San Roque, Cádiz). 113
• Foto 4.3. Eliminación de dunas para uso agrícola. Isla Cristina (Huelva). 113
• Foto 4.4. Pastoreo de ganado ovino del pastizal de dunas. 113
• Foto 4.5. Plantación de pinos en las dunas de Guardamar (Alicante). 114
• Foto 4.6. Destrucción de sistema dunar por la urbanización de La Antilla (Lepe, Huelva). 116
• Foto 4.7. Fragmentación del cordón dunar costero por visitantes de la playa (Camposoto, Cádiz). 117
• Foto 4.8. Fragmentación del sistema dunar por la creación de senderos a pie (Playa de la Hierbabuena, Barbate, Cádiz). 117
• Foto 4.9. Campo de Golf sobre las dunas de El Saler (Valencia). 117
• Foto 4.10. Construcción de diques y puertos en Guardamar (Alicante). 118

Capítulo 5

Figuras

• Figura 5.1. Diagrama de los índices parciales de vulnerabilidad. Los valores de los distintos índices parciales de vulnerabilidad aumentan con la distancia al punto de intersección de los ejes. 133
• Figura 5.2. Tramos costeros con vulnerabilidad baja. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar. 134
• Figura 5.3. Tramos costeros con vulnerabilidad media. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar y a la dinámica sedimentaria erosiva. 134

Tablas

• Tabla 5.1. Lista de control aplicada en el estudio de vulnerabilidad del sistema dunar. . 123 a 127

• Tabla 5.2. Índices parciales y totales de vulnerabilidad. **IGD**: índice geomorfo-sedimentario del sistema dunar; **IIM**: índice de incidencia marina; **IIE**: índice de incidencia eólica; **ICV**: índice de características de la cubierta vegetal; **IPU**: índice de presión de uso. 133

Capítulo 6 **Página**

Tablas

- Tabla 6.1. Actuaciones que deben contemplar los proyectos de restauración de sistemas dunares costeros. 139
- Tabla 6.2. Situaciones en las que se realizan actuaciones para la reconstrucción dunar. 140
- Tabla 6.2.A. Perfil teórico de un cordón dunar. 141
- Tabla 6.3. Ventajas y desventajas de los tipos de reconstrucción topográfica. 141
- Tabla 6.4. Posibilidades de reconstrucción del cordón dunar en relación con el balance sedimentario del sector costero. 142
- Tabla 6.5. Captadores de mimbre. 146
- Tabla 6.6. Captadores de espartina. 147
- Tabla 6.7. Tablestacas de madera. 148
- Tabla 6.8. Cerramiento de madera y malla metálica. 160
- Tabla 6.9. Cerramiento de madera o madera plástica. 161
- Tabla 6.10. Cerramiento de madera y cuerda. 162
- Tabla 6.11. Pasarelas llanas de madera sin barandilla. 166
- Tabla 6.12. Pasarelas llanas de madera con barandilla. 167
- Tabla 6.13. Pasarelas de madera en escalera con barandilla. 168
- Tabla 6.14. Pasarelas de madera adaptadas a discapacitados físicos. 169

Fotos

- Foto 6.1. Sistema dunar degradado por sobrepresión turística. 138
- Foto 6.2. Brechas en un cordón dunar producidas por el paso de usuarios. 140
- Foto 6.3. Restos de un cordón dunar. 140
- Foto 6.4. Captadores estructurales. 143
- Foto 6.5. Captadores de apoyo. 143
- Foto 6.6. Efecto de los captadores. 144
- Foto 6.7. Instalación de los captadores. Distribución sobre el terreno. 144
- Foto 6.8. Instalación de los captadores. Apertura de zanja y colocación. 144
- Foto 6.9. Efecto de las tablestacas. 145
- Foto 6.10. Plantación de barrón. Apertura de hoyos. 150
- Foto 6.11. Plantación de barrón. Colocación de las plantas. 151
- Foto 6.12. Plantación de barrón al cabo de un año. 151
- Foto 6.13. La misma plantación al cabo de dos años. 151
- Foto 6.14. Pasarela de acceso a la playa. 164
- Foto 6.15. Cartel explicativo de los procesos de degradación. 170
- Foto 6.16. Cartel explicativo de la flora dunar. 170

Cuadros

- Cuadro 6.1. Fertilizantes de liberación lenta. 155 a 157

Capítulo 7 **Página**

Tablas

• Tabla 7.1. Programa de producción del vivero de Loredo. 206
• Tabla 7.2. Especies dunares que se cultivan en España. 207 a 212

Fotos

• Foto 7.1. Espigas de barrón después de su recolección. 184
• Foto 7.2. Espigas extendidas para su secado. 185
• Foto 7.3. Semillas de barrón preparadas para su almacenamiento. 185
• Foto 7.4. Semillas de azucena de mar. 187
• Foto 7.5. Contenedores rellenos con substrato antes de la colocación de la semilla. 188
• Foto 7.6. Distribución de las semillas en los contenedores. 188
• Foto 7.7. Contenedores sembrados. 188
• Foto 7.8. Comienzo del desarrollo de las plántulas en contenedor. 189
• Foto 7.9. Cultivo de barrón a los dos meses de la siembra. 189
• Foto 7.10. Contenedores en el exterior para su aclimatación. 189
• Foto 7.11. Parcela preparada para la siembra. 191
• Foto 7.12. Proceso de siembra. 191
• Foto 7.13. Plántulas de barrón a los pocos días de su germinación. 192
• Foto 7.14. Barrón a los nueve meses de la siembra. 192
• Foto 7.15. Barrón adulto preparado para su traslado a obra. 192
• Foto 7.16. Grama marina en estado natural. 193
• Foto 7.17. Cultivo de grama marina. 193
• Foto 7.18. Cultivo de azucena de mar. 194
• Foto 7.19. Cultivo de cardo marino. 195
• Foto 7.20. Cultivo de oruga de mar. 195
• Foto 7.21. Ataque de hongos en los contenedores. 204
• Foto 7.22. Sistema utilizado para la limpieza de la arena. 205

Cuadros

• Cuadro 7.1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de reproducción. 178, 179
• Cuadro 7.2. Banco de semillas. 186

Capítulo 8

8.1. Liencres (Cantabria)

Fotos

• Foto 8.1.1. Vista aérea de la zona de estudio. 215
• Foto 8.1.2. Temporal en Liencres. 217

• Foto 8.1.3. Transporte masivo de arena hacia el interior. 217
• Foto 8.1.4. Detalle de fenómenos erosivos en el frente dunar. 217
• Foto 8.1.5. Aspecto general del arenal. 218
• Foto 8.1.6. Filas de captadores para regenerar la duna. 218
• Foto 8.1.7. Resultado de la revegetación del frente dunar. 218

8.2. El Saler (Valencia)

Fotos

• Foto 8.2.1. Sector costero restaurado. 219
• Foto 8.2.2. Proceso de montaje de los captadores de Spartina. 220
• Foto 8.2.3. Aspecto del cordón dunar restaurado. 221
• Foto 8.2.4. Detalle de la vegetación plantada entre los captadores. 221
• Foto 8.2.5. Otro detalle. 221
• Foto 8.2.6. Captación en la duna embrionaria. 222
• Foto 8.2.7. Aspecto general. 222
• Foto 8.2.8. Cierres realizados con cañizos. 222

8.3. Enebrales (Huelva)

Fotos

• Foto 8.3.1. Vista aérea de la zona de estudio. 223
• Foto 8.3.2. Aspecto general del cordón dunar de Los Enebrales. 224
• Foto 8.3.3. Enebro costero (*Juniperus oxycedrus* subsp *macrocarpa*). 224
• Foto 8.3.4. Sabina (*Juniperus phoenicea subsp turbinata*). 224
• Foto 8.3.5. Detalle de la erosión del frente dunar. 225
• Foto 8.3.6. Detalle del frente erosionado. 225
• Foto 8.3.7. Incipiente captación de arena en primera fila. 225
• Foto 8.3.8. Detalle del establecimiento de la vegetación. 226
• Foto 8.3.9. Detalle de pasarela sobre el cordón dunar. 226

8.4. El Espigón (Huelva)

Fotos

• Foto 8.4.1. Aspecto del área de estudio. 227
• Foto 8.4.2. Aspecto del perfil dunar antes de las obras. 228
• Foto 8.4.3. Detalle de la vegetación del frente dunar. 228
• Foto 8.4.4. Apertura de la zanja para la instalación de los captadores. 228
• Foto 8.4.5. Pasarelas de acceso a la playa. 229
• Foto 8.4.6. Detalle de la captación de arena en las primeras fases. 229
• Foto 8.4.7. Otro detalle de la captación. 229
• Foto 8.4.8. Aspecto del nuevo frente dunar con la vegetación establecida. 230



El **'Manual de restauración de dunas costeras'** aborda a lo largo de nueve capítulos, las principales técnicas para su restauración. Para ello, hace un extenso repaso a aspectos clave en el desarrollo y conservación de los sistemas dunares costeros como son los **Procesos Físicos**, analizados a través de la morfodinámica de las playas, la morfología de las dunas, los parámetros sedimentológicos y el transporte eólico. El capítulo dedicado a la **Ecología** ofrece una aproximación a la vegetación y la morfología dunar, las características ambientales del sistema playa-duna, las adaptaciones de las especies de plantas, los tipos funcionales de plantas frente al estrés ambiental costero, la zonación de vegetación, la descripción de las comunidades de vegetación, la conservación y protección de especies y comunidades y las especies exóticas.

En cuanto a los **Usos e Impactos**, cabe destacar la extracción de arenas y de agua freática, el uso agrícola y ganadero, las plantaciones forestales, la urbanización y las actividades recreativas, entre otros. El apartado denominado **Diagnóstico** plantea la evaluación del estado de conservación y la vulnerabilidad del sistema dunar. A continuación, las páginas destinadas a las **Técnicas de Restauración**, profundizan en la reconstrucción morfológica, la revegetación, la eliminación de la vegetación invasora, los sistemas de protección, el seguimiento de las obras de restauración y el mantenimiento de las mismas.

El capítulo 7 observa los **Métodos de Cultivo de Plantas Dunares** incluyendo los tipos de reproducción vegetal, las especies utilizadas, las características del cultivo, así como la producción de barrón, Grama marina y Azucena marina. Además, se incluyen varios ejemplos prácticos que sirven de manera ilustrativa al lector a la hora de plantearse los principios básicos de una restauración de dunas costeras.

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE