

## Resumen

El balance hídrico expresa el balance entre la entrada y salida de agua en un territorio. La modelización de este ayuda a entender el ciclo hidrológico a nivel local. Generando datos de balance hídrico entre diferentes tiempos, podemos analizar a su vez los efectos del cambio climático en la cantidad de agua disponible variando las variables de este tipo que se utilizan en la modelización, proporcionando a los investigadores la capacidad de cuantificar la disponibilidad y la demanda de humedad de una manera significativa. Por la coyuntura ambiental actual, es importante generar un conjunto de datos y capas de balance hídrico de diferentes fechas de áreas hidrológicamente importantes de Puerto Rico como los son las cuencas que alimentan el Bosque Nacional El Yunque para posteriores análisis, la mejora en resolución de datos similares disponibles, así también la generación de un código que pueda modelizar este proceso de manera automatizada y sistemática utilizando softwares vigentes. Para llevar a cabo el balance hídrico de cuencas a nivel de píxel se parte de una serie de datos y otras variables calculadas. Se genera una ficha hídrica para cada píxel con el cálculo entre entradas de precipitación y salidas como evapotranspiración. Se desarrolla un solo código automatizado que calcula un balance hídrico anual completo para cada píxel dentro de un modelo digital de elevaciones y capas de datos. Se presenta un índice relativo de demanda de humedad superficial para divisiones hidrográficas y la comparación temporal entre resultados cambiando los datos climatológicos para cada año. Se encuentra una tendencia positiva a déficit de agua anualmente en el área de estudio. Cambios en patrones climáticos durante los pasados 32 años han afectado paulatinamente el almacenamiento de agua en las cuencas hidrográficas del Bosque El Yunque. Se anexa el código que automatiza los cálculos y los resultados anuales en base de datos.

## Objetivos

- ▶ Automatización de cálculo de balance hídrico.
- ▶ Análisis de cambios en balance hídrico por variaciones en patrones climáticos en cuencas hidrográficas de Puerto Rico.
- ▶ Creación de una base de datos geoespacial (.gdb) con modelos de excedentes y deficiencias anuales en balance hídrico para cuencas hidrográficas en Puerto Rico así también los resultados de evapotranspiración real anuales.

## Metodología

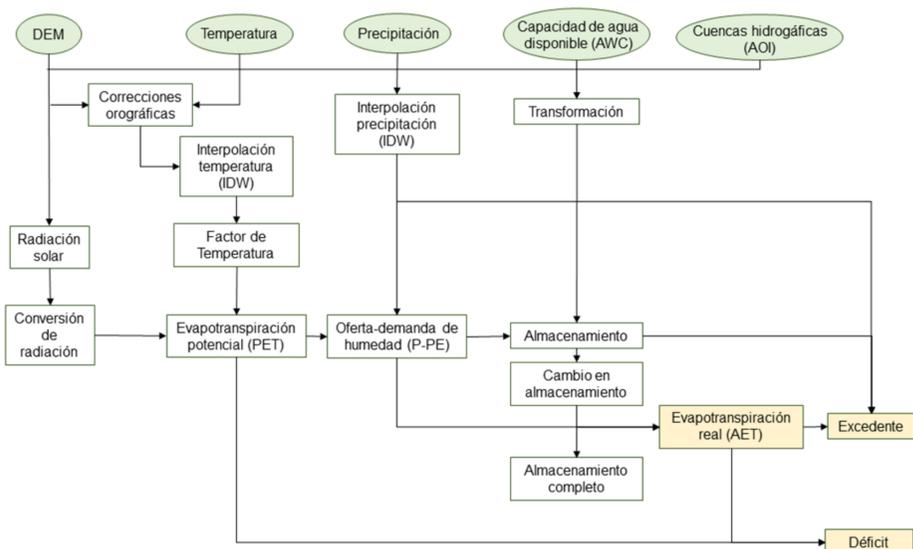
Se desarrolla un código en Python 3.7 para automatizar el proceso de cálculo de modelo de balance hídrico a nivel de píxel. El proceso de escribir un script con este propósito incluyó buscar la manera de que con una sola ejecución del código se puedan correr no solo las herramientas necesarias sino los cálculos de preprocesos y correcciones requerida. El script se desarrolló utilizando mayormente las librerías de arcpy, sys y datetime. El paquete de ArcPy, incluyendo el módulo de Análisis Espacial, fue utilizado para todos los cálculos en GIS utilizando ArcGIS Pro 2.8.

Para ejecutar el script se requiere preparar una base de datos (.gdb) con los datos de entrada, verdes en el organigrama de metodología. Para preparar los datos y preprocesarlos se utilizó otro código de Python desarrollado y Microsoft Excel.

La ecuación de evaporación potencial utilizada en el desarrollo fue la propuesta por Turc (1961) donde T es temperatura y R radiación (mensuales):

$$PET = 0.013 \left( \frac{T}{T + 15} \right) (R + 50)$$

El script se aplicó para realizar un estudio de caso en el cual se pueda aprovechar la automatización desarrollada. Luego de tener el balance hídrico automatizado, se ejecutó para realizar un análisis anual y el estudio de cambios en déficit y excedente de agua y evapotranspiración real en el área de estudio

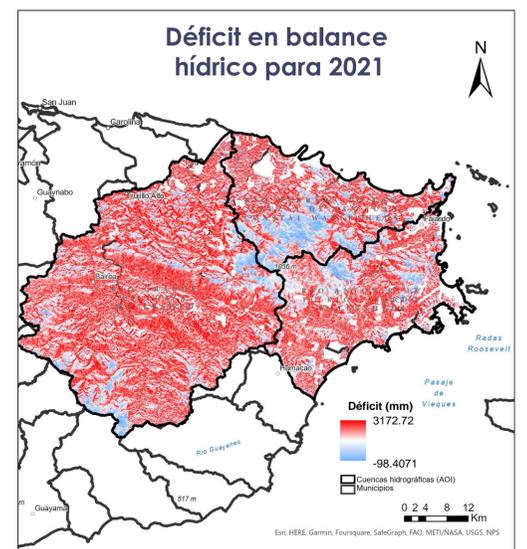
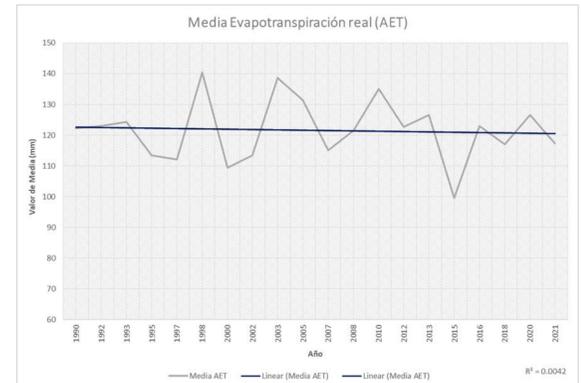
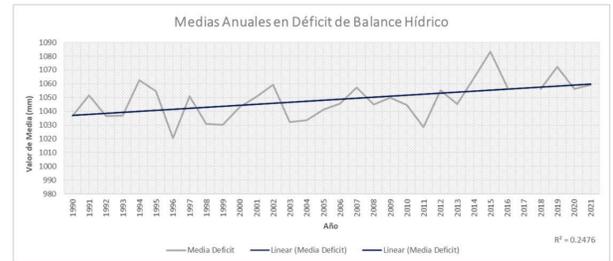


## Resultados

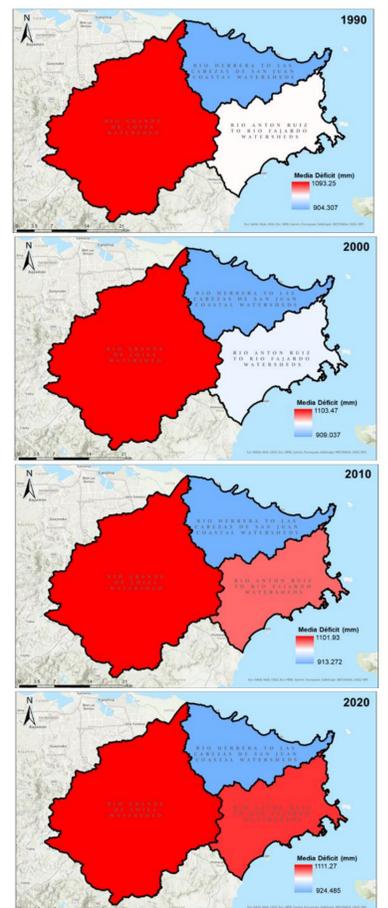
Resultados de déficit dan información de la demanda evaporativa no satisfecha por el agua disponible, es decir, la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real. Los datos demuestran una tendencia de aumento en déficit de 0.74mm de agua anuales en el área de estudio por variaciones en patrones climáticos. El gráfico muestra una tendencia progresiva.

El excedente de agua brinda información del exceso de agua no evaporada o transpirada, que sale de un sitio a través de la escorrentía o el flujo subterráneo. Los resultados demuestran un valor casi nulo de cambio con una pendiente en la línea de tendencia de 6E-05, casi 0.

La evapotranspiración real se refiere a la pérdida de agua de una superficie con vegetación dada la disponibilidad de agua. Esta es igual al agua disponible o la evapotranspiración potencial si es menor. Los datos evidencian una tendencia de disminución en evapotranspiración real de -0.11mm en el área de estudio por variaciones en patrones climáticos



Estadísticos zonales con cambios en valores medios de déficit en balance hídrico cada década en las tres cuencas hidrográficas del AOI



La cuenca hidrográfica con valores más altos de deficiencia anual en balance hídrico es la del Río Grande de Loíza, al oeste del área de estudio. En la comparación de estadísticos zonales de valores medios en déficit de agua es muy notable el fenómeno descrito sobre el efecto orográfico de la zona donde la precipitación que traen los vientos alisios del noreste mantiene la zona con los valores de déficit más bajos. La cuenca de Río Antón Ruiz a Río Fajardo, al sureste del área de estudio, ha ido progresivamente aumentando su deficiencia en agua, causando probablemente la tendencia vista en el gráfico con mismos valores.

## Conclusiones

Se ha desarrollado una automatización que calcula modelos de balance hídrico a través de Python y GIS. Los resultados de la tendencia en aumento en el déficit de agua en las cuencas que alimentan el Bosque Nacional El Yunque por cambios en patrones climáticos son noticias negativas para el estado de la zona. Aun así, los datos obtenidos de los modelos realizados podrían servir de argumentos para la conservación y protección del espacio natural y para mejorar el manejo de los recursos hídricos. Evidentemente los cambios en patrones climáticos durante los pasados 32 años han afectado paulatinamente el almacenamiento de agua en las cuencas hidrográficas que drenan el Bosque Nacional El Yunque.

## Bibliografía

- Dyer, J. (2019) A GIS-Based Water Balance Approach Using a LiDAR-Derived DEM Captures Fine-Scale Vegetation Patterns. *Remote Sensing*, 11 (20), 2385. doi:10.3390/rs11202385
- Dyer, J., Bourg, N., McShea, W. (2015) Using a Water Balance Approach to Examine Forest Dynamics on The Smithsonian Conservation Biology Institute Large Forest Dynamics Plot. [Poster presentation]. AAG Annual Meeting, Chicago, IL.
- Dyer, J. (2009) Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecol.* 24, 391-404
- Fu, P., Rich, P. (2000) A Geometric Solar Radiation Model And Its Applications In Agriculture And Forestry. e Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry. 357-364.