



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica,
Cartográfica y Topográfica

VARIACIONES EN BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS
HIDROGRÁFICAS DEL NORESTE DE PUERTO RICO
POR CAMBIOS EN PATRONES CLIMÁTICOS
AUTOMATIZANDO MODELIZACIÓN A NIVEL DE PÍXEL
ENTRE 1990-2021

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación

AUTOR/A: Garcia Lopez, Wilfredo

Tutor/a: Pardo Pascual, Josep Eliseu

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

**VARIACIONES EN BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS
HIDROGRÁFICAS DEL NORESTE DE PUERTO RICO POR
CAMBIOS EN PATRONES CLIMÁTICOS AUTOMATIZANDO
MODELIZACIÓN A NIVEL DE PÍXEL ENTRE 1990-2021**

Autor: Wilfredo A. García López

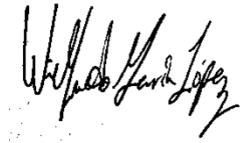
Tutor: Dr. Josep E. Pardo Pascual

Julio 2022

COMPROMISO

"El presente documento ha sido realizado completamente por el firmante; no ha sido entregado como otro trabajo académico previo y todo el material tomado de otras fuentes ha sido convenientemente entrecomillado y citado su origen en el texto, así como referenciado en la bibliografía"

Firmado:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Wilfredo García López". The signature is written in a cursive style with a large initial 'W' and a long, sweeping underline.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio (AOI) en contexto con Puerto Rico.....	10
Figura 2. Cuencas hidrográficas que comprenden el área de estudio.....	11
Figura 3. Bosque Nacional El Yunque, parte del área de estudio.....	11
Figura 4. Unidades hidrológicas en contexto con extensión de Bosque El Yunque.....	12
Figura 5. Estaciones de precipitación con relación a área de estudio para año 1990...	13
Figura 6. Estaciones de temperatura con relación a área de estudio para año 1993.....	14
Figura 7. Esquema de corrección orográfica.....	21
Figura 8. Esquema de metodología desarrollada en código y aplicada en estudio de caso luego de preparación de datos de entrada en base de datos espacial.....	30
Figura 9. Estructura de base de datos (.gdb).....	35
Figura 10. Gráfico de medias anuales en déficit de agua y tendencia.....	37
Figura 11. Gráfico de medias anuales en excedente de agua y tendencia.....	38
Figura 12. Gráfico de medias anuales en evapotranspiración real y tendencia.....	39
Figura 13. Mapas de estadísticos zonales con cambios en valores medios de evapotranspiración real cada década en las tres cuencas hidrográficas del AO.....	43
Figura 14. Mapas de estadísticos zonales con cambios en valores medios de déficit de balance hídrico cada década en las tres cuencas hidrográficas del AOI.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos empleados en el trabajo.....	16
Tabla 2. Extracto de CSV descargado para año 2015 de precipitaciones.....	33
Tabla 3. Extracto de tabla del “Feature Class” de precipitaciones para año 2015.....	33
Tabla 4. Extracto de CSV descargado para año 2015 de temperatura.....	34
Tabla 5. Extracto de tabla del Feature Class de temperaturas para año 2015.....	34
Tabla 6. Presupuesto estimado para realización del trabajo.....	45

ÍNDICE DE CONTENIDO

Compromiso.....	1
Resumen.....	6
Introducción.....	8
Contexto.....	10
I. Área de Estudio (AOI).....	10
II. Estaciones Meteorológicas.....	12
Objetivos.....	15
Herramientas.....	15
Datos.....	16
Metodología.....	20
I. Automatización de balance hídrico.....	20
1. Desarrollo de script.....	20
1.1 Tratamiento de datos y correcciones.....	20
1.1.1 Correcciones orográficas.....	20
1.1.2 Transformación de litología.....	23
1.1.3 Cálculo de radiación solar.....	24
1.2 Herramientas y cálculos.....	25
1.2.1 Evapotranspiración potencial (PET) y Factor de temperatura.....	26
1.2.2 Conversión de radiación solar y PET.....	26
1.2.3 Precipitación-Evapotranspiración (P-PE).....	27
1.2.4 Almacenamiento.....	27
1.2.5 Cambio de almacenamiento.....	28
1.2.6 Evapotranspiración real (AET) y Déficit.....	28
1.2.7 Almacenamiento completo.....	28
1.2.8 Excedente.....	29
II. Estudio de caso.....	31
1. Recolección de datos.....	31
2. Manejo de datos.....	31
2.1 Área de estudio (AOI).....	31
2.2 Modelo digital de elevaciones (DEM).....	32

2.3 Suelos.....	32
2.4 Precipitación.....	32
2.5 Temperatura.....	33
3. Preparación de Base de Datos (GDB).....	35
4. Corrida de script por año.....	36
Resultados.....	36
I. Conjuntos de datos.....	36
II. Déficit.....	37
III. Excedente.....	38
IV. Evapotranspiración Real (AET).....	39
Análisis.....	40
I. Estadísticos Zonales.....	41
Presupuesto.....	45
Conclusiones.....	46
I. Futuros Esfuerzos.....	46
II. Impacto de Trabajo.....	48
Discusión.....	49
Cartografía.....	52
Bibliografía.....	57
Anexo: Código	

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.

The water balance expresses the balance between the input and output of water in a territory. Doing this modeling helps to understand the hydrological cycle at the local level. By generating water balance data between different times, we can in turn analyze the effects of climate change on the amount of water available by varying variables of this type used in modeling, providing researchers the ability to quantify availability and

moisture demand in a significant way. Due to the current environmental situation, it is important to generate a set of data and water balance layers from different dates of hydrologically important areas of Puerto Rico, such as the watersheds that feed the El Yunque Forest for later analysis, the improvement in resolution of similar data available, as well as the generation of a script that can model this process in an automated and systematic way using current software. To carry out the water balance of watersheds at the pixel level, we start from a series of data and other calculated variables. A water record is generated for each pixel with the calculation between precipitation inputs and outputs such as evapotranspiration. A single automated code is developed that calculates a complete annual water balance for each pixel within a digital elevation model and data layers. A relative index of surface moisture demand is presented for hydrographic divisions and the temporal comparison between results changing the climatological data for each year. A positive tendency to water deficit is found annually in the study area. Changes in climate patterns over the past 32 years have gradually affected water storage in the El Yunque Forest watersheds. The code that automates the calculations and the annual result in the database is attached.

INTRODUCCIÓN

El agua es el principal recurso de cualquier sociedad, conocer información detallada de la capacidad de retención o almacenamiento del mismo es crucial para cualquier región, en especial, una isla en el Caribe. Por la crisis climática que atraviesa el planeta, varios estudios van demostrando las variaciones en el clima y eventos extremos que van afectando cada vez más la disponibilidad del mismo. El clima y el ciclo hidrológico están intrínsecamente vinculados de tal manera que variaciones en precipitación y el aumento de temperaturas en los escenarios más probables con el cambio climático, tendrá un impacto significativo en la disponibilidad de los recursos hídricos del mundo (Martínez-Austria, P., Patiño-Gómez, C., 2012). Según datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas inglés), en el 2015 se extrajo 724 millones de galones por día (Mgd) (2740638.13 m^3) de agua de los ríos, embalses y acuíferos de Puerto Rico (Dieter, C. et al., 2018). Según el Servicio Forestal de Estados Unidos (USFS, por sus siglas en inglés) en los municipios que abarcan El Bosque Nacional El Yunque, los retiros en 2010 totalizaron 58 Mgd (219553.88 m^3). Existen actualmente datos del mismo USGS y de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) de balance hídrico para el EEUU y sus territorios, pero a una escala pequeña. Métodos para calcular el balance hídrico se han implementado y desarrollado bastante, algunos pocos específicamente con un enfoque basado en sistemas de información geográfica de los cuales existen cajas de herramientas disponibles que pueden utilizarse de manera manual (Dyer, J., 2013). La disponibilidad de humedad es función de la precipitación y la capacidad de agua disponible en el suelo, mientras que la demanda de humedad, o sea, la

evapotranspiración potencial, está determinada por la temperatura con su corrección orográfica y carga de radiación solar controlada topográficamente.

En Puerto Rico existe una necesidad de datos anuales de alta resolución de balance hídrico que puedan estar disponibles para futuros estudios, a su vez, un programa automatizado que genere este tipo de cálculo de manera sistemática.

Se busca crear una base de datos geoespacial de capas de información geográfica referentes al balance hídrico en cuencas de alto valor ambiental en Puerto Rico para que estén disponibles para futuras investigaciones. Uno de los efectos directos del cambio climático en la Isla son las sequías y el aumento en cantidad de fenómenos atmosféricos y de mayor intensidad, por lo que conocer el estatus de cuánta agua se retiene y sale del territorio isleño proveerá información importante para el manejo del agua y aporta a la ruta de un país más resiliente. Además, poder automatizar una metodología basada en herramientas de GIS en un solo código con los cálculos y correcciones necesarias implica un aporte importante a la disciplina. Se busca también presentar una solución actualizada con versiones de softwares más novedosos.

La automatización de la modelización del balance hídrico en cuencas hidrográficas del noreste Puerto Rico generará datos de manera más rápida para entender cómo disminuye la disponibilidad de agua por cambios en patrones climáticos.

CONTEXTO

I. Área de Estudio (AOI)

El área de estudio del trabajo es una zona hidrológicamente coherente, por tratarse de un análisis de este contexto. Se trabajó con una conjugación de tres cuencas hidrográficas en el noreste de la isla grande de Puerto Rico en las Antillas Mayores del Caribe. Las cuencas hidrográficas que constituyen el AOI son la Cuenca del Río Grande de Loíza, Cuenca de Río Herrera a Cabezas de San Juan y la Cuenca de Río Antón Ruíz a Río Fajardo (Figura 2). La consideración para esta área recae en su importancia geográfica para la Isla, esta constituye las tres cuencas que le suplen agua al bosque principal de Puerto Rico, el “Yunque National Forest” (Figura 3). Este es el único bosque tropical lluvioso del sistema de bosques nacionales de Estados Unidos de América y sus territorios. El área del bosque es de unos 117.36 km², un importante recurso de agua para toda su zona. El área total del AOI es de 1332.97 km² (Figura 1). Los valores de precipitación más altos en Puerto Rico se registran en el Yunque.



Figura 1. Área de estudio (AOI) en contexto con Puerto Rico.

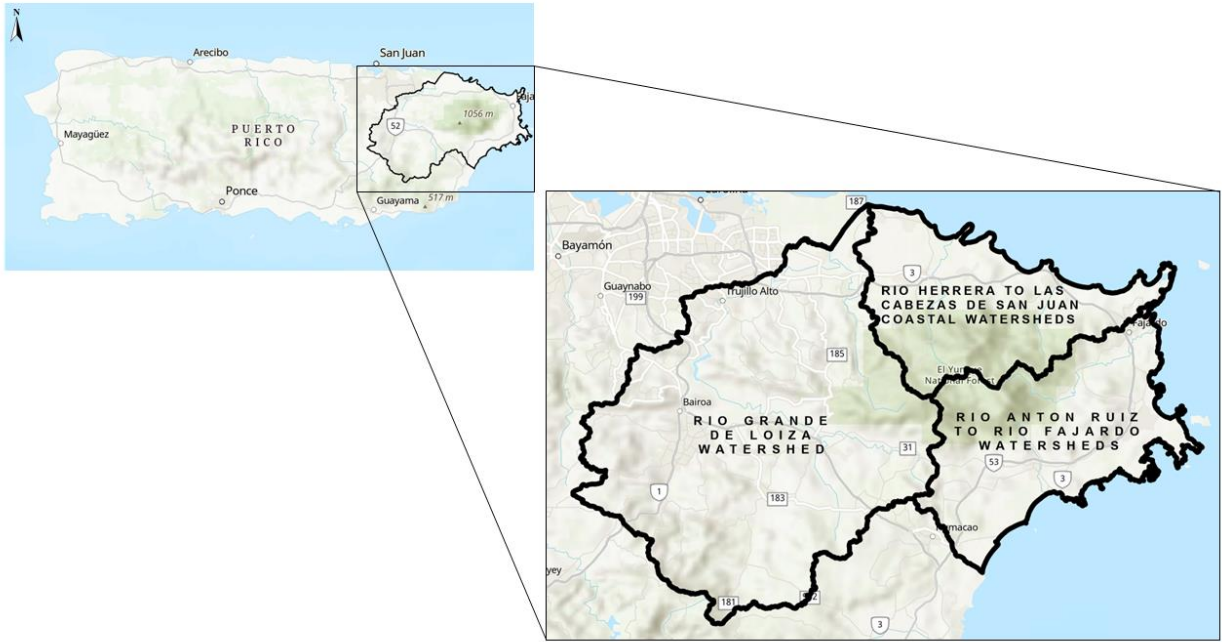


Figura 2. Cuencas hidrográficas que comprenden el área de estudio.



Figura 3. Bosque Nacional El Yunque, parte del área de estudio. Fuente: USFS, USDA

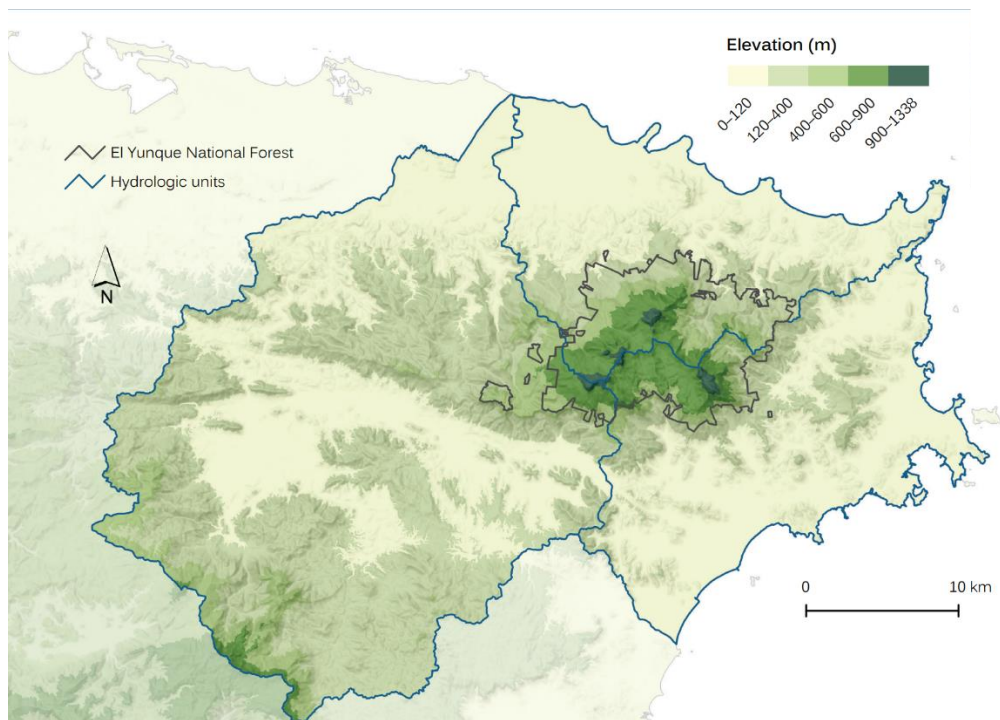


Figura 4. Unidades hidrológicas en contexto con extensión de Bosque El Yunque.
Fuente: (Quiñones, M. et al., 2018)

II. Estaciones Meteorológicas

La información climatológica (precipitación y temperatura), se adquiere de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA, por sus siglas en inglés) como se explica en detalle en la sección de Datos de este documento. La cantidad de estaciones meteorológicas varía cada año analizado ya que se utiliza las estaciones con datos disponibles para cada año. De hecho, la década de 1990-2000 la cantidad de estaciones meteorológicas con datos era mayor que las décadas subsiguientes. Aunque la mayoría de las estaciones contienen datos para cada año, la cantidad de meses con datos varía. Así también, los datos de temperatura y precipitación se descargan de manera separada para trabajarlos de este modo.

Para que la interpolación de estas variables climáticas tuviera una coherencia mayor se realizaron más allá del área de estudio. Es por esto que se trabajó con puntos de estaciones en todas las islas de Puerto Rico. Así también, como se trabaja con un área al este de la isla mayor, se añaden datos de las Islas Vírgenes de EUA que provienen de la misma fuente de información y son de naturaleza parecida. La Figura 5 muestra la cantidad total de estaciones meteorológicas con información de precipitación. El ejemplo en concreto de la figura es para el 1990, año con mayor cantidad de datos disponibles, 103 estaciones en concreto. La Figura 6 muestra la cantidad total de estaciones meteorológicas con información de temperatura. El ejemplo en concreto de la figura es para el 1993, año con mayor cantidad de datos disponibles para esta variable, 35 estaciones en concreto.

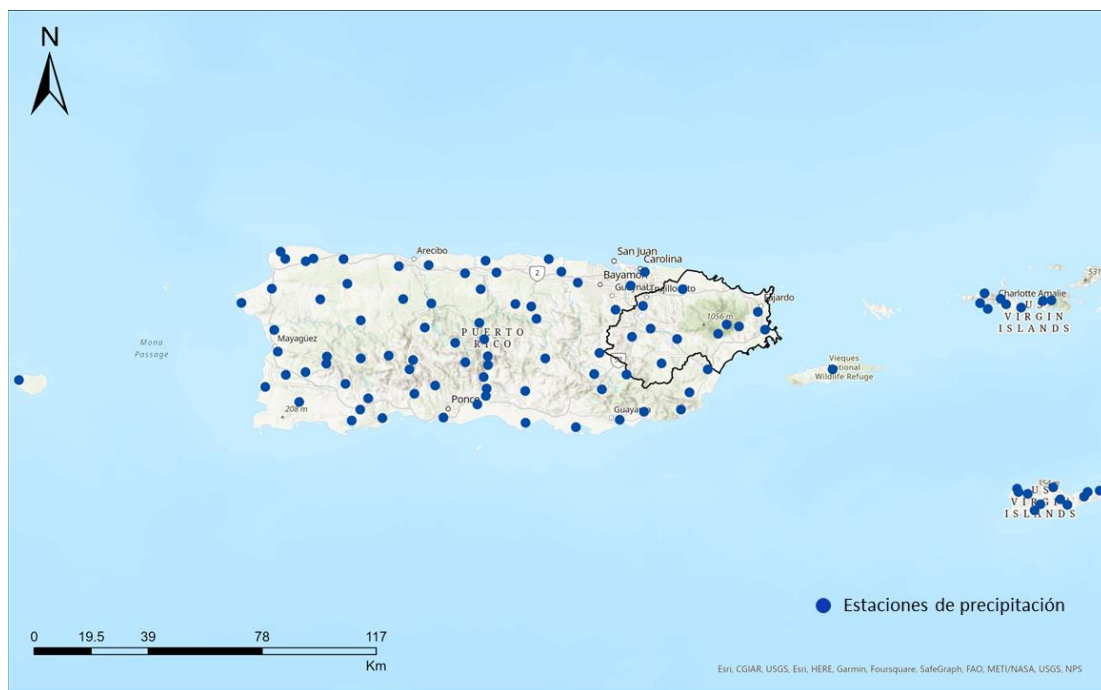


Figura 5. Estaciones de precipitación con relación a área de estudio para año 1990.

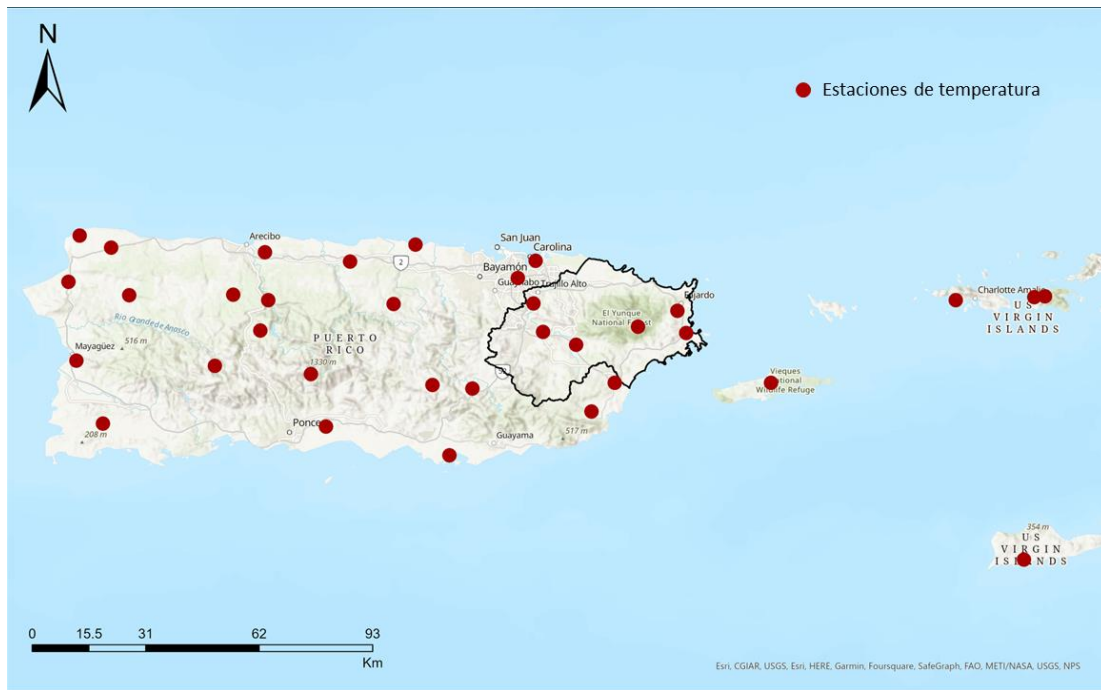


Figura 6. Estaciones de temperatura con relación a área de estudio para año 1993.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar una automatización en Python para que a través de GIS pueda calcular modelos de balance hídrico leyendo una base de datos preparada con los datos que se deseen y poder utilizar la herramienta creada para el estudio de una zona que comprende tres cuencas hidrográficas en el noreste de Puerto Rico y analizar variaciones a través de los años. Para la cumplir con este objetivo general, se subdivide el proyecto en varios objetivos específicos:

- 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.

Como resultado se podrá tener un código para la automatización de modelos ya mencionados, así como también un estudio aplicativo en un área de interés.

HERRAMIENTAS

Para la realización del trabajo se han utilizado programas de sistemas de información geográfica, programación y manejo de tablas.

- ESRI's ArcGIS Pro 2.8.4
- Python 3.7.10
- Microsoft Excel for Microsoft 365 v.2205

DATOS

Los datos utilizados para el trabajo se describen en la Tabla 1. Además de incluir información de la descarga y adquisición de los mismos, así como también información métrica y de resolución, se incluye en la última columna el nombre que corresponde en la base de datos geoespacial que se utilizó (o se utilizaría) para que el modelo a través del código reconozca cada variable. Esto se describe y explica con más detalle en la sección de Metodología de este documento.

Categoría	Nombre	Fuente	Descripción	Formato descarga	Nombre y formato en gdb
Climatología	Precipitación	National Centers for Environmental Information (NCEI) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) accedidos a través del Climate Data Online (CDO).	Los datos de precipitación se descargaron en formato CSV con la información de precipitación diaria en milímetros (mm) y coordenadas de estaciones climatológicas que comprenden las islas de Puerto Rico e Islas Vírgenes de EUA para cada año individual. Los datos se procesaron de manera automática con código de python para que cumplieran con la estructura de tabla requerida para el código de balance hídrico e importados para las bases de datos de cada año.	CSV	Estaciones_Precp (Feature Class)

	Temperatura		<p>Los datos de precipitación se descargaron en formato CSV con la información de temperaturas media para cada mes en grados Celsius (°C) y coordenadas de estaciones climatológicas que comprenden las islas de Puerto Rico e Islas Vírgenes de EUA para cada año individual. Los datos se procesaron manualmente para que cumplieran con la estructura de tabla requerida para el código de balance hídrico e importados para las bases de datos de cada año.</p>	CSV	Estaciones_Temp (Feature Class)
Suelos	Capacidad de agua disponible (AWC)	Soil Survey Geographic Database (SSURGO) del Natural Resources Conservation Service (NRCS) accedidos a través del SSURGO Downloader	<p>Los datos de capacidad de agua disponible se obtuvieron a través de capas de información de suelo. Se utilizó la columna llamada "aws0100wta" con descripción de: "Available Water Storage 0-100 cm – Weighted Average" que contenía la información de capacidad de agua disponible en centímetros (cm). Se generó una columna nueva llamada "AWC_mm" para almacenar la conversión a milímetros (mm). Se importó el shapefile a la base de datos de cada año.</p>	Shapefile	Litología (Feature Class)

Topografía	Modelo digital de elevaciones (DEM)	National Aeronautics and Space Administration (NASA) y Earth Resources Observation and Science (EROS) del U.S. Geological Survey (USGS) accedidos a través de EarthExplorer	Se descargaron imágenes georreferenciadas en formato TIFF para luego generar un mosaico que comprende el área de las islas de Puerto Rico y las Islas Vírgenes de EUA. La resolución obtenida es de 1 arco-segundo ($\approx 30\text{m}$) de 1 x 1 grados, con fecha de publicación de 05-2020 como parte del 3D Elevation Program (3DEP).	GeoTIFF	DEM (Raster Dataset)
Hidrografía	Cuencas hidrográficas	National Hydrography Dataset (NHD) creado por el National Geospatial Program del U.S. Geological Survey (USGS) accedidos a través de Datos.PR del Instituto de Estadísticas de Puerto Rico.	La capa de cuencas hidrográficas se extrajo del conjunto de datos del sistema hidrográfico de Puerto Rico a alta resolución desarrollado a escala 1:24,000/1:12,000. Se utilizó la capa "WBDHU10" que representa perímetro de unidad hidrológica de 10 dígitos (5to nivel) en el Watershed Boundary Dataset (WBD) de EUA, el nivel que representa la cuenca hidrográfica. Se utilizó esta capa para establecer el área de estudio (AOI) con tres cuencas de Puerto Rico. Se importó corte del shapefile a la base de datos de cada año.	Shapefile	AOI (Feature Class)

	Microcuencas hidrográficas		La capa de microcuencas hidrográficas se extrajo del conjunto de datos del sistema hidrográfico de Puerto Rico a alta resolución desarrollado a escala 1:24,000/1:12,000. Se utilizó la capa "WBDHU12" que representa perímetro de unidad hidrológica de 12 dígitos (6to nivel) en el Watershed Boundary Dataset (WBD) de EUA, el nivel que representa la subcuenca hidrográfica. Se utilizó esta capa para análisis zonales.	Shapefile	-
--	----------------------------	--	---	-----------	---

Tabla 1. Datos empleados en el trabajo.

METODOLOGÍA

I. Automatización de balance hídrico

1. Desarrollo de script

Se desarrolla un código en python 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 requeridos. El script se desarrolló utilizando mayormente el IDE de PyScripter y 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. Se ha seleccionado la utilización de este lenguaje de programación ya que es el que permite automatizar flujos de trabajo y geoprocursos desde los softwares de ArcGIS y las librerías antes mencionadas. El software de GIS utilizado cuenta con las herramientas que se necesitan para la realización de los cálculos necesarios de una manera confiable y avanzada.

1.1 Tratamiento de datos y correcciones

El script antes de comenzar con los cálculos estrictamente del modelo hidrológico realiza las correcciones y conversiones necesarias de los datos de entrada para poder utilizarse en los cómputos siguientes.

1.1.1 Correcciones orográficas

Respecto a los datos climatológicos, las temperaturas se proyectaron a nivel del mar, se interpolaron por IDW y luego se crearon los modelos zonales raster

mensuales considerando la elevación de cada píxel. Las precipitaciones se interpolaron por IDW directamente desde los valores existentes.

El script utiliza la capa de temperatura y el DEM para hacer la corrección considerando topografía. Se emplea la ecuación 1:

$$T_m + (0.6 * (COTA/100)) \quad (1)$$

Donde T_m es el valor de temperatura media para cada mes, COTA es el valor de altitud extraída de píxel del DEM y utilizando el gradiente térmico de $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$. El valor estándar dado por el International Standard Atmosphere (ISA), es de un cambio de 6.5°C cada 1 KM, es decir, 0.65°C cada 100 metros. En cuanto al valor de cota, si bien pudiera ser que los datos de temperatura tuvieran la altitud de cada estación, el script extrae los valores del DEM por puntos de la capa para así tener consistencia en el valor topográfico utilizado durante todo el modelo.

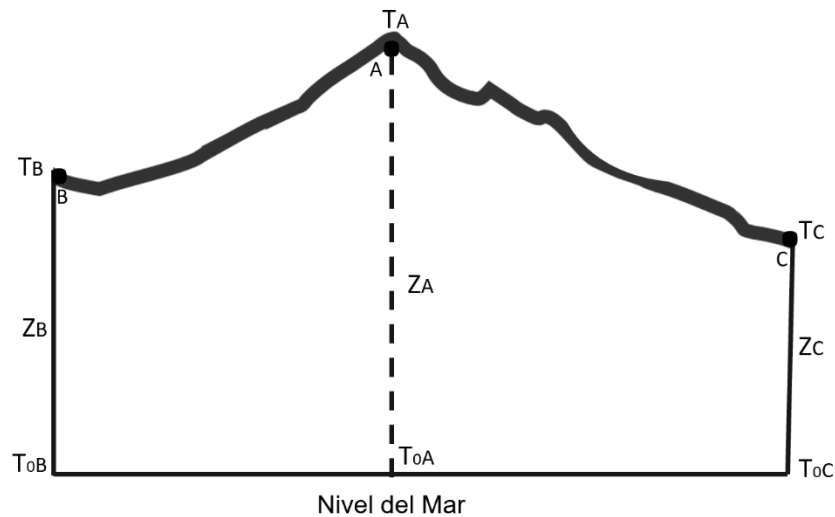


Figura 7. Esquema de corrección orográfica.

En la Figura 7 se observa cómo se obtiene la temperatura de la superficie (LST por sus siglas en inglés) que es la necesaria para emplearse en el resto del

modelo, a diferencia de la temperatura del aire que calculan la mayoría de las estaciones meteorológicas. Es importante realizar la corrección orográfica para considerar la topografía. Es crucial realizar la interpolación con las temperaturas de la superficie terrestre ya que es la que describe los procesos de intercambio de energía y agua entre la atmósfera y la superficie, es la que interactúa directamente con otras variables físicas como la humedad del suelo y la vegetación. Si utilizamos como ejemplo obtener la temperatura de la superficie en el punto A (T_A), se utilizaría las siguientes expresiones (2 y 3) donde Z_A es la altitud del punto A y T_{0A} es la temperatura a nivel del mar.

$$T_{0A} = T_A + ((0.6 * (Z_A/100)) \quad (2)$$

$$T_A = T_{0A} - ((0.6 * (Z_A/100)) \quad (3)$$

Con las temperaturas a nivel del mar es que el script realiza la interpolación por ponderación de distancia inversa (IDW, “inverse distance weighted”) donde se estima los valores de las celdas con un promedio de los valores de los puntos vecinos de cada celda. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tiene en el proceso de promedio. Se calcula con una radio de clase “RadiusVariable” el cual define que, los puntos de entrada que se utilizarán para interpolar el valor de cada celda en el ráster de salida serán un número específico de puntos de muestra. El script cuenta la cantidad de estaciones con las que va a realizar la interpolación y utiliza ese valor para este parámetro. La distancia máxima utilizada es el valor predeterminado que es la longitud de la diagonal de la extensión, que especifica la distancia en unidades de mapa, por la que limitar la búsqueda de los puntos

de muestra de entrada más cercanos. La interpolación de precipitaciones se realiza directamente con los datos que vienen de las estaciones meteorológicas también con IDW. Para ambos escenarios, se trabajó con este tipo de interpolación IDW ya que funciona de manera simple y no requiere análisis específicos como otros modelos más perfectos que se pudieran aplicar. Es relativamente poca la influencia que pudiera tener la manera de interpolar en el resultado final, por lo que se ha seleccionado incluir en el desarrollo la solución más simple.

1.1.2 Transformación de litología

La capa de litología preparada como se explica en la sección de Datos, se encuentra en formato vectorial. El código busca la capa y la transforma a formato ráster utilizando el campo que tiene la información de capacidad de retención de agua del suelo, en este caso debe llamarse "AWC_mm". El ráster resultante de este paso en el script es el utilizado para describir esta medida de volumen en mm. El AWC ("Available Water Capacity") se describe como "la capacidad de retención de agua del suelo, es una medida de la cantidad de agua que el suelo puede retener y que la mayor parte está disponible para uso de las plantas a través de la evapotranspiración. El volumen máximo de AWC es el agua del suelo a capacidad de campo, y el mínimo es el punto de marchitez." (E.Rabot, et. al, 2018) El script asigna los valores de celda con el área combinada máxima, donde la característica combinada de la capa vectorial con el área más grande dentro de la celda determinará el valor que se asignará al pixel.

1.1.3 Cálculo de radiación solar

El script utiliza datos de radiación solar para cálculos posteriores. Se utiliza la herramienta "Area Solar Radiation" de ArcPy la cual deriva la radiación solar entrante de una superficie en formato ráster a partir del DEM, basándose en métodos del algoritmo de cuenca visual hemisférica desarrollado por Rich et al. (Rich et al. 1994) y Fu y Rich (2000). La herramienta recibe el parámetro de latitud el cual es una variable al comienzo del script que debe editarse según el área que se trabaje. El valor de tamaño de cielo configurado en el script es de 200 celdas. Esta es la resolución o tamaño de cielo de la cuenca visual o mapa de cielo/solar. El parámetro de periodo de tiempo utilizado fue de múltiples días desde el día 1 al día 31 en el año del cual se desea obtener el modelo. El año es otra variable al principio del script que debe editarse dependiendo para cuándo se ejecuta el modelo. El intervalo de días es de 14 días (bisemanal) y el intervalo de horas de 1. Ambos intervalos usados para el cálculo de sectores de cielo para el mapa solar. Se configuró además para que calcule un valor total único de radiación para todas las localidades. El parámetro de factor z es de 1, lo predeterminado por tener unidades x,y,z en el mismo sistema de medidas. La información de pendiente y aspecto se derivó del DEM. El valor de direcciones de cálculo, es decir, el número de direcciones de azimut usadas para calcular la cuenca visual fue de 32, lo adecuado para topografías complejas. Los valores de divisiones cenitales y divisiones de acimut usados para crear los sectores en el mapa del cielo se configuraron a 8. El tipo de modelo de radiación difusa utilizado fue el de cielo uniforme donde la radiación difusa entrante es la misma

desde todas las direcciones del cielo. El valor de proporción de flujo de radiación difusa configurado fue de 0.3, generalmente utilizado para condiciones de cielo despejado. Por último, el parámetro de transmisividad, es decir, la fracción de radiación que pasa a través de la atmósfera (longitudes de onda totales promediadas) configurado fue de 0.5, también generalmente utilizado para condiciones de cielo despejado.

1.2 Herramientas y cálculos

El código desarrollado trabaja de tal manera que va almacenando información y rasters que genera en un conjunto de ficheros. La carpeta principal es llamada *intermediate_data*, dentro de esta deben existir los ficheros llamados:

aet_rasters, def_rasters, p_pe_rasters, pet_rasters, precp_rasters, soil_rasters, solar_rasters, st_rasters, surplus_rasters, temp_rasters, topo_rasters,

turcpe_rasters y *working*. En estas carpetas se guardan todos los datos

necesarios durante la ejecución del script. Las interpolaciones de climatología descritas en el pasado apartado se han almacenado en las carpetas

temp_rasters y *precp_rasters*. Igualmente, con los datos que se describen

próximamente, se almacenan en carpetas con nombres relacionados a su

categoría. Cada sección próxima de la metodología, constituye una función (def)

particular en el script desarrollado. Cada vez que se corra el código los datos

intermedios se van a sobrescribir, a menos que los guarde en otra carpeta antes

de ejecutar otra vez el script. Los resultados de cada modelo los guarda en una

base de datos llamada *Results.gdb* con el año específico en el nombre de cada ráster.

1.2.1 Evapotranspiración potencial (PET, por sus siglas en inglés) y Factor de temperatura

El primero cálculo directo para el balance hídrico fue la evapotranspiración potencial acorde a lo desarrollado por Turc (1961). La fórmula (4) utilizada es la siguiente:

$$PET = 0.013 * (T / (T+15)) * (R + 50) \quad (4)$$

Donde PET es la evapotranspiración potencial en mm, T es la temperatura en grados Celsius y R es la radiación (Wh/m²).

La evapotranspiración potencial se refiere a la pérdida de agua por evaporación de una superficie con vegetación dependiente principalmente del calor y la radiación y supone ilimitadas las disponibilidades de agua.

Primeramente, el script calcula la variable de temperatura en la expresión de Turc descrita anteriormente para cada mes. Ya que la expresión es dependiente de la temperatura, el modelo verifica valores negativos de temperatura.

1.2.2 Conversión de radiación y PET

Luego de calcular la variable de temperatura, en esta próxima función el script calcula el componente de “R + 50” de la ecuación de Turc descrita anteriormente. Esta se calcula primeramente convirtiendo la radiación solar (Wh/m²) a energía por centímetro cuadrado (cal/cm²) multiplicándola por la constante de 0.08598 para luego esta multiplicarla por el valor del factor de temperatura obtenido anteriormente siguiendo la metodología por Dyer (2013).

El script se desarrolló para que actúe considerando que es un ambiente húmedo al que se le aplica el modelo por lo que no se ajusta con factor de humedad

relativa. Los resultados mensuales de PET de esta parte son los que se utiliza como definitivos, el modelo desarrollado no se ajusta para tomar en cuenta patrones diurnos de temperatura basados en pendiente y orientación topográfica.

1.2.3 Precipitación-Evapotranspiración (P-PE, por sus siglas en inglés)

El script en su siguiente función calcula la oferta-demanda de humedad (P-PE). Los valores positivos en de esta indican que las plantas cumplen con la humedad necesaria mediante precipitación, mientras que valores negativos indican que las plantas deben recurrir al almacenamiento de humedad del suelo para cumplir sus necesidades de agua. El script calcula la diferencia entre precipitación (que viene siendo la disponibilidad de agua) y PET de cada mes, además de la división por días de cada mes para tener valores diarios y mensuales de P-PE.

1.2.4 Almacenamiento

Los próximos cálculos del código los hace para obtener el almacenamiento de humedad del suelo, valores mensuales que representan el valor de almacenamiento del último día el mes. El modelo desarrollado emplea un paso de tiempo diario, asumiendo una disponibilidad decreciente de humedad del suelo. Si los valores de P-PE calculados en la función anterior son todos positivos, no necesita realizar los cálculos, la oferta (P) supera la demanda (PE) y las plantas no van a utilizar el almacenamiento de humedad del suelo. En este caso el script asigna a los valores del ráster de AWC (que representa almacenamiento completo) al de almacenamiento de humedad. Si algún ráster

de P-PE tiene valores negativos, el script realiza los cálculos necesarios para calcular almacenamiento de humedad del suelo. El código desarrollado consulta los resultados de P-PE mensuales y los organiza de tal manera que encuentre el primer mes con valores negativos y comience los cálculos a partir de ese. De encontrarse con un mes con valores todos positivos, le asigna el AWC y sigue con los próximos meses hasta terminar con el mes anterior al cual han empezado los cálculos.

1.2.5 Cambio en almacenamiento

El siguiente paso del código es calcular la diferencia en almacenamiento de un mes al siguiente. Esto representa la utilización de las plantas o la recarga.

1.2.6 Evapotranspiración real (AET, por sus siglas en inglés) y Déficit

La próxima función que realiza el código es calcular la evapotranspiración real y el déficit, mensual y anual para ambos casos. El valor absoluto de la diferencia de almacenamiento mensual es sumado con la precipitación. El resultado de la suma se utiliza para calcular el AET donde se realiza un cálculo condicional al P-PE con condición de valores mayores a 0 asignando los valores del cálculo anterior como verdaderos y los valores de PET a lo que no cumpla con la condición. El déficit se calcula con la diferencia entre el PET y el AET para cada mes.

1.2.7 Almacenamiento completo

En esta sección del script, se busca los meses donde el almacenamiento de las celdas individuales venga completo. El almacenamiento en el suelo primero debe alcanzar la capacidad de campo antes de que pueda haber agua

excedente. Presumiblemente, las plantas han estado utilizando la humedad del suelo a medida que avanza la temporada de crecimiento, la humedad del suelo se recarga (normalmente) durante el otoño y el invierno. En el área de estudio (cercano al Trópico de Cáncer) para cual se desarrolla el script las estaciones no son precisamente marcadas.

1.2.8 Excedente

El último cálculo que realiza el código es el excedente anual y mensual. El script desarrollado calcula la diferencia entre precipitación y AET para luego utilizar el resultado en un condicional al ráster resultante de la comparación entre almacenamiento y AWC, tomando valores positivos la diferencia anterior y falsos como 0. Luego el resultado de esta condición se le resta la diferencia en almacenamiento mensual para hacer otro cálculo de condición al ráster donde el almacenamiento viene completo tomando como valores positivos la diferencia anterior y negativos la condición anterior.

El script desarrollado incluye varias partes que apoyan el cálculo del modelo. El código da la opción de ajustar el año y la latitud de donde se quiere aplicar el modelo.

Además, es necesario la especificación de direcciones (“paths”) de las bases de datos con las que se trabajará. Se debe ajustar la dirección de la base de datos que contiene los datos del año que se quiere estudiar (“workspace_gdb” en script) y la dirección de la base de datos donde guardará los resultados del código (“workspace_gdbr” en script).

Se añade además que el código extraiga la extensión del área de estudio especificada y utilizar esa extensión para realizar cortes y permitir que cálculos y resultados se

ajusten al AOI. La siguiente Figura 8 muestra el organigrama del esquema automatizado en el script y aplicado al área de estudio para cada año.

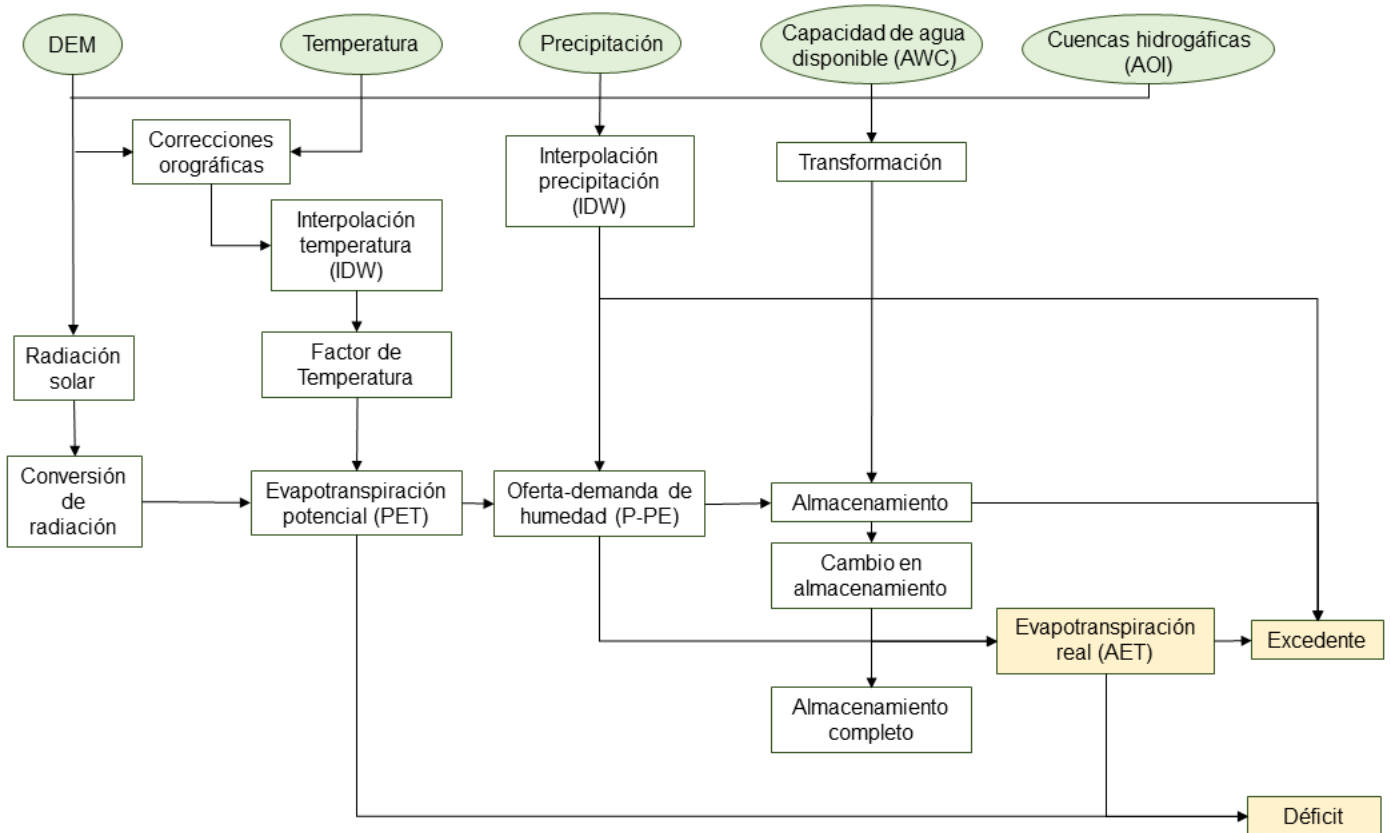


Figura 8. Esquema de metodología desarrollada en código y aplicada en estudio de caso luego de preparación de datos de entrada en base de datos espacial.

II. Estudio de caso

El script explicado en el apartado anterior de la metodología se aplicó para realizar un estudio de caso en el cual se pueda aprovechar la automatización desarrollada. El contexto y área de estudio utilizada se detallan en apartados anteriores de este documento, al igual que las herramientas utilizadas.

1. Recolección de datos

Como se explica en la sección de Datos de este documento, la información necesaria para el estudio de caso se consiguió a través de plataformas digitales y descargadas de páginas web de agencias gubernamentales. Los datos se guardaron en formato de descarga original para luego procesarlos y organizarlos en una base de datos.

2. Manejo de datos

Luego de la descarga, los datos se deben preprocesar antes de incluirlos a la base de datos que lee el script. Estas capas de información se manejaron desde dentro y fuera del software de GIS. Parte de este proceso es descrito en la Tabla 1 de la sección de Datos de este documento.

2.1 Área de estudio (AOI)

La capa de área de interés/estudio (AOI) se extrajo desde la información descargada de hidrografía. Seleccionando las cuencas hidrográficas con las que se quería trabajar, descritas en la sección de Contexto de este documento, se exportaron a otro "Feature Class" para generar el polígono final.

2.2 Modelo digital de elevaciones (DEM)

El conjunto de imágenes ráster de modelos digitales de elevaciones descargados comprenden las islas de Puerto Rico y las Islas Vírgenes de E.U.A. Se generó un mosaico de estas imágenes y se conservó toda su extensión sin realización de cortes. Esto se mantuvo así ya que, al tener áreas con datos climatológicos fuera del área de estudio, se requería de información topográfica extensa para realización de correcciones orográficas necesarias.

2.3 Suelos

La capa litológica obtenida consta de una serie de campos de información sobre el suelo. Se descargaron 4 capas de las regiones de Puerto Rico y se unieron. La columna "aws0100wta" que incluía la información del "Available Water Storage 0-100 cm – Weighted Average", es decir, la capacidad de agua disponible en centímetros (cm) se utilizó para convertir a milímetros (mm) y almacenar en columna nueva llamada "AWC_mm". Con esta columna es que el script, como se menciona en la sección anterior de Metodología, realiza los cálculos necesarios.

2.4 Precipitación

Los datos de precipitación se descargaron en formato CSV para cada año. La tabla incluía el nombre de la estación, número de estación, latitud, longitud, elevación, fecha y la precipitación en milímetros. La estructura de la tabla no se ajusta a lo que el script de balance hídrico necesita recibir para su funcionamiento. Además, se necesita calcular promedios mensuales y anuales para cada estación. La tabla recuperada de NOAA devuelve datos diarios

repetiendo cada estación tantos días en el mes. La Tabla 2 es un ejemplo de la estructura en la que se descargó los datos de precipitación.

STATION	NAME	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION	DATE	PRCP
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/16/2015	4.8
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/17/2015	12.4
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/18/2015	0
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/19/2015	0.8
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/20/2015	0
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/21/2015	8.9
RQ1PRCL0001	CAROLINA 1.5 SSW, PR RQ	18.38712339	-65.99759281	48.8	2/22/2015	11.2

Tabla 2. Extracto de CSV descargado para año 2015 de precipitaciones.

Se desarrolló un script en Python para que maneje estas tablas y las estructure de la manera necesaria. Es importante además convertir la tabla a una capa de puntos de GIS. El script también realiza dicha conversión utilizando las columnas de latitud y longitud para visualizar datos xy. En la Tabla 3 se muestra el formato final que debe tener el “Feature Class” de estaciones de precipitación.

STATION	NAME	LATITUDE	LONGITUDE	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11	MP12	MP13
RQC00660040	ACEITUNA WATER TREATMENT PLANT, PR US	18.1469	-66.4919	2.8742	1.7393	0.0000	11.0733	12.6032	4.6433	10.4516	12.3516	12.5433	23.1581	2.0300	1.6323	7.9250
RQC00660053	ADJUNTAS 1 NW, PR US	18.1613	-66.7222	3.7208	0.4375	0.8759	5.5700	10.4240	10.3633	14.0875	10.6931	13.2045	18.1621	3.4360	0.3593	7.6112
RQC00660061	ADJUNTAS SUBSTATION, PR US	18.1747	-66.7977	3.4226	0.7000	0.5258	6.2700	7.7968	5.5500	8.2677	7.0806	13.1033	18.4387	3.2200	1.1871	6.2969
RQC00660152	AGUIRRE, PR US	17.9555	-66.2222	0.6323	0.2571	0.0194	1.3233	7.0097	4.3267	6.3194	2.5483	1.8033	11.7290	1.2767	0.3935	3.1366
RQC00660158	AIBONITO 1 S, PR US	18.128	-66.2641	7.5581	0.6393	0.2871	2.2600	6.1871	2.9200			6.9000		4.5464	2.1387	
RQC00660426	ARECIBO OBSERVATORY, PR US	18.3494	-66.7525	13.8000	2.1357	0.3613	16.5967	12.3645	6.2833	5.3452	10.2226	5.3067	6.3355	5.7533	0.6290	7.0945
RQC00660668	BARCELONETA 3 SW, PR US	18.42861	-66.56306	13.7516	1.2714		11.3133	11.0290	6.0667	9.6258	2.6097	6.8833	6.0258	3.9567		
RQC00660948	BOCA, PR US	17.9906	-66.816	1.2613	0.0393	0.0161	1.7833	7.9000	1.9100	7.0935	2.2839	2.5533	14.2774	1.8467	0.3226	3.4406
RQC00661142	CACAOS OROCOVIS, PR US	18.22583	-66.50389	13.2129	2.8607	1.1065	9.1933	9.8355	2.6067	10.5774	10.6645	14.7533	13.8903		1.8290	
RQC00661345	CALERO CAMP, PR US	18.4724	-67.1155	6.4484	0.2286		5.9933	4.0806	6.5500	4.6452	4.1871	3.6700		2.8600	1.0355	

Tabla 3. Extracto de tabla del “Feature Class” de precipitaciones para año 2015.

2.5 Temperatura

Al igual que los datos de precipitación, las temperaturas se descargaron en formato CSV para cada año. Las tablas incluían las columnas de nombre de estación, número de estación, latitud, longitud, elevación, fecha y temperatura

promedio mensual. Igualmente, la estructura de la tabla no se ajusta a lo que el script de balance hídrico necesita recibir para su funcionamiento, ni tampoco incluye los valores de promedio mensual y anual necesarios. La Tabla 4 muestra un ejemplo de la estructura que se descargó los datos de temperatura.

STATION	NAME	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION	DATE	TAVG
RQC00660061	ADJUNTAS SUBSTATION, PR US	18.1747	-66.7977	557.8	2005-01	19
RQC00660152	AGUIRRE, PR US	17.9555	-66.2222	7.6	2005-02	25.2
RQC00660158	AIBONITO 1 S, PR US	18.128	-66.2641	710.2	2005-03	18.3
RQC00660426	ARECIBO OBSERVATORY, PR US	18.3494	-66.7525	323.1	2005-04	21.3
RQW00011603	BORINQUEN AIRPORT, PR US	18.494861	-67.129444	72.2	2005-05	23.3

Tabla 4. Extracto de CSV descargado para año 2015 de temperatura.

Para estructurar la tabla a un formato que el script desarrollado pueda leer, se procesó cada tabla de cada año de manera manual en Excel para tenerlas de manera ideal. Se importaron las tablas a GIS para convertir a capa de puntos utilizando las columnas de latitud y longitud para visualizar datos xy.

STATION	NAME	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
RQC00660061	ADJUNTAS SUBSTATION, PR US	18.1747	-66.7977	557.8	19.8	20.1	19.8	20.7	21.9	22.8	23	23.1		22.9			
RQC00660158	AIBONITO 1 S, PR US	18.128	-66.2641	710.2	20.7	20.9	20.7	22.1	23.2	24.2	24.1	24.5	24.2	23.5	22.1	21.4	22.63
RQC00662801	COLOSO, PR US	18.3808	-67.1569	12.2	24.4	25	24.7	25.6	26.6	27.1	27.2	27.4	27.7	27.6	25.8	25.2	26.19
RQC00666343	CULEBRA HILL, PR US	18.2973	-65.2901	71.3	26.2	25.9	25.5	26.5	27.5	28	28.3	28.6	29	29.1	27.4	26.6	27.38
VQW00011640	CYRIL E. KING AIRPORT, VI US	18.33626	-64.97994	0	25.7	25.8	25.8	26.9	27.9	28.8	29.7	29.7	29.5	28.4	27.3	26.8	27.69
RQC00663431	DOS BOCAS, PR US	18.3361	-66.6666	61	23.9	24.3	24.2	24.7	26.5	27.5	27.1	27.3	27.3	25.6	25.1	25.87	
RQC00664193	GUAYAMA 2 E, PR US	17.9783	-66.0874	21.9	26.7	27.1	26.7	27.6	28.8	29.7	28.9	29.2	29.3	29.3	27.1	27.8	28.18

Tabla 5. Extracto de tabla del Feature Class de temperaturas para año 2015.

3. Preparación de Base de Datos (GDB)

Para que el script reconozca los datos con los que trabajará, es necesario crear una base de datos en ArcGIS en formato de "File Geodatabase" (.gdb). Los datos de entrada son los que en la Tabla 1 aparecen sombreados en la última columna. En esa columna se especifica además el nombre que debe tener la capa en la base de datos para se reconozca así también el formato. La Figura 9 muestra cómo debe estar estructurado el GDB para ser reconocido efectivamente por el script.

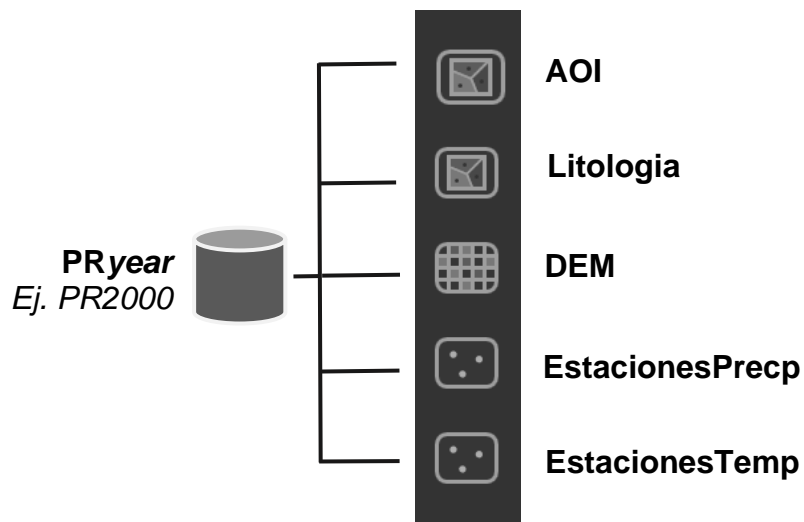


Figura 9. Estructura de base de datos (.gdb)

Se prepararon bases de datos anuales desde 1990 a 2021, un total de 32. El estudio que se quiso llevar a cabo era cambiando las variables climatológicas a través de los años por lo que las capas de temperatura y precipitación corresponden a cada año y son diferentes para cada base de datos, los datos de

DEM, litología y AOI son iguales. El nombre de cada base de datos debe llevar el año del cual esas capas de clima corresponden, en el caso de la figura anterior habría que sustituir la palabra *year* por el número del año.

4. Corrida de script por año

Luego de tener el script desarrollado y tener un modelo de balance hídrico automatizado, se procede a ejecutarlo para realizar el análisis anual y el estudio de cambios en déficit y excedente de agua en el área de estudio. Luego de tener las bases de datos geográficas preparadas con los datos necesarios y respectivos nombres, desde un entorno de desarrollo integrado (IDE) de Python se puede ejecutar cambiando la variable de año. Cada vez que se ejecute el script, se debe cambiar el año (“year” en script) para que utilice la base de datos específica que contiene datos climatológicos específicos del año de estudio.

RESULTADOS

I. Conjuntos de datos

Se consiguió la automatización de cálculo de balance hídrico a través de un solo código. Con esto, se consigue una base de datos (.gdb) que contiene los resultados de las distintas corridas de modelo para los años de 1990 a 2021 para las cuencas hidrográficas del noreste de Puerto Rico que comprenden el área de estudio. La base de datos incluye resultados de deficiencia anual (32 años), excedentes anuales (32 años) y evapotranspiración real para 22 años. Este conjunto de datos puede proveerse a personas que deseen utilizarlo para futuros análisis y estudios en formato de “File Geodatabase” (.gdb).

II. Déficit

Se obtuvieron datos ráster de déficit de agua anuales para el período de 1990 a 2021 en el área de estudio. Estos resultados dan información de la demanda evaporativa no satisfecha por el agua disponible, es decir, la diferencia entre la evapotranspiración potencial y real. Se extrae la información de la media de cada ráster para su posterior análisis. El siguiente gráfico muestra la tendencia de los promedios en déficit anuales. 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.

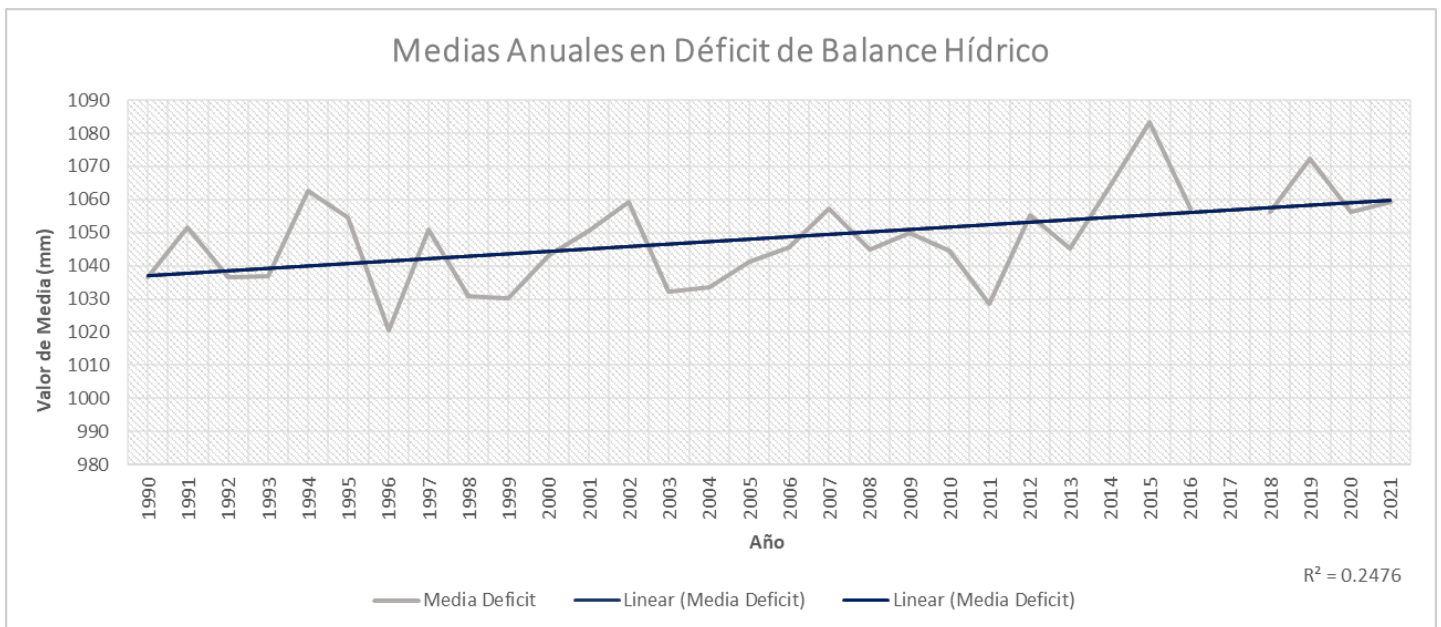


Figura 10. Gráfico de medias anuales en déficit de agua y tendencia.

III. Excedente

Se obtuvo ráster de excedente de agua anuales para el período de 1990 a 2021 en el área de estudio. Este conjunto de resultados brinda información del exceso de agua no evaporada o transpirada, que sale de un sitio a través de la escorrentía o el flujo subterráneo. El gráfico de la Figura 11 muestra la tendencia de los promedios de excedente anuales. Los resultados demuestran un valor casi nulo de cambio con una pendiente en la línea de tendencia de $6E-05$, casi 0.

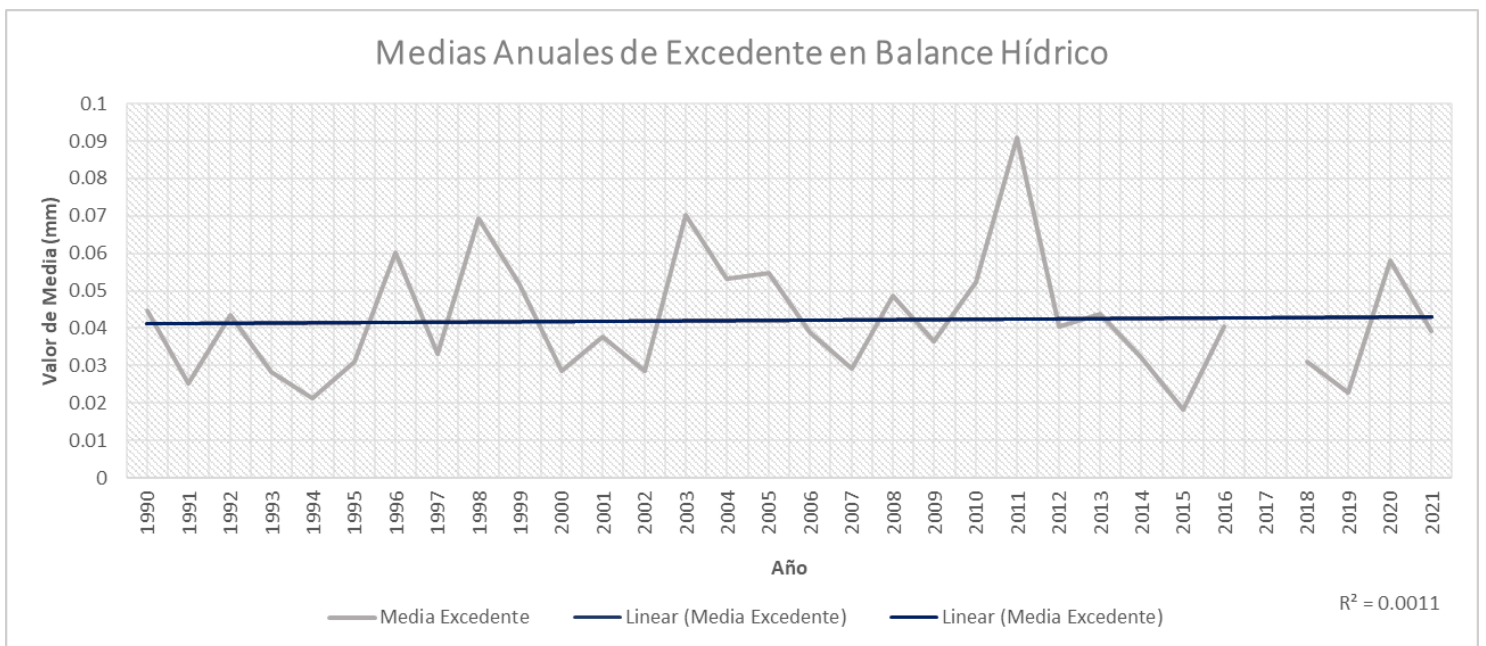


Figura 11. Gráfico de medias anuales en excedente de agua y tendencia.

IV. Evapotranspiración Real (AET)

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. Se obtuvo ráster de evapotranspiración real anual para 22 años entre el período de 1990 a 2021 en el área de estudio. El gráfico de la Figura 12 muestra la tendencia de los valores medios de evapotranspiración real anuales. Los datos demuestran una tendencia de disminución en evapotranspiración real de -0.11mm en el área de estudio por variaciones en patrones climáticos.

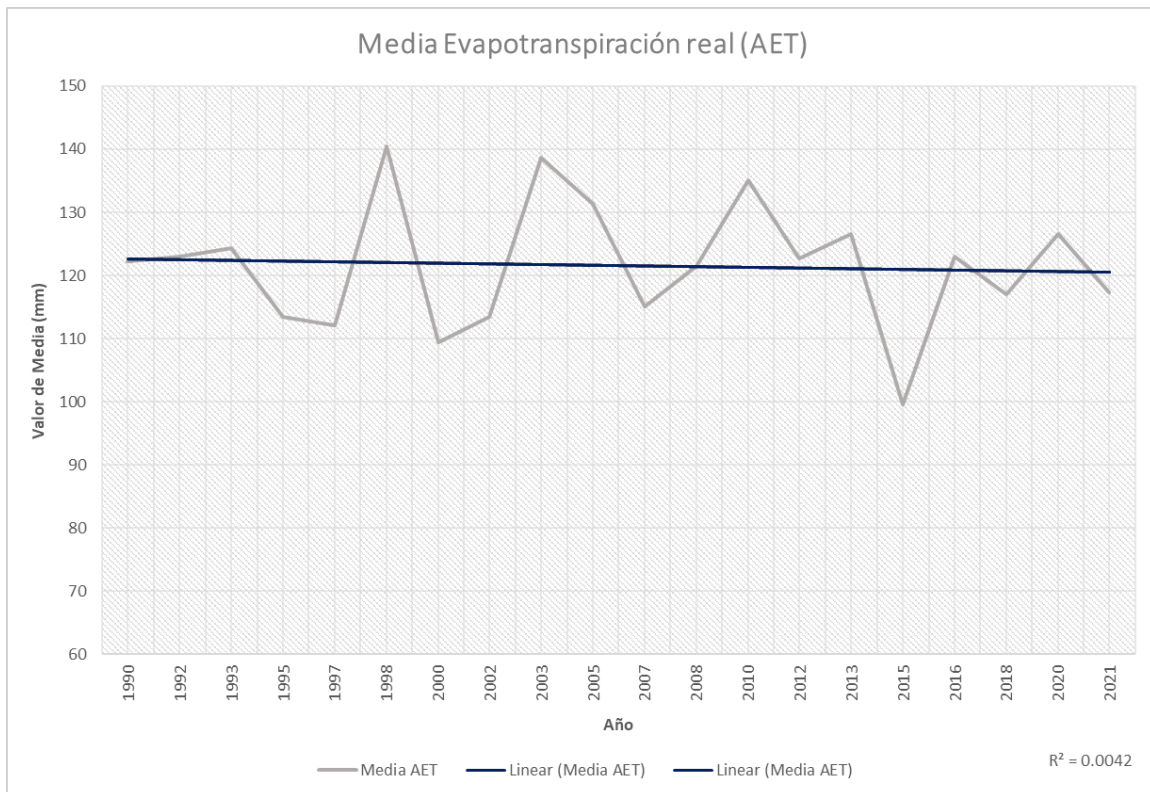


Figura 12. Gráfico de medias anuales en evapotranspiración real y tendencia.

Se incluye en la sección de Cartografía de este documento, mapas para el año 2021 de déficit en balance hídrico y evapotranspiración real.

ANÁLISIS

La Figura 10, que muestra los valores medios de déficit anual en balance hídrico, muestra una tendencia positiva a través de los años. Existe una variabilidad interanual bastante alta ya que hay muchos factores que intervienen en el modelo. Esto provoca que se obtenga un valor de R^2 bajo, de 0.2476, donde la tendencia es uno de los factores que intervienen. La tendencia muestra un patrón hacia un ambiente progresivo más seco, el cual a través de los años va aumentando la deficiencia de agua en las cuencas estudiadas.

Por otro lado, en la Figura 11 se observa el gráfico de la media anual de excedentes en balance hídrico. La línea de tendencia nos muestra que no existe tal patrón de excedentes anuales a través de los años. El valor de R^2 es muy cercano a 0, por lo que no presenta un patrón progresivo ni decreciente en tendencia, sino más bien una estabilidad durante el periodo de 32 años. Igualmente existe una variabilidad interanual considerable.

Con las curvas de valores medios en déficit y excedentes es notable ver que hay un patrón a la deficiencia de agua a través de los 32 años estudiados. La tendencia en estos valores medios es de un R^2 bastante mayor a los excedentes, demostrando así un patrón de pérdida de agua a través de los años sin cambios significantes en excedentes.

Los datos de 2017 se excluyeron del análisis por la calidad de los mismos. Dicho año ocurrió un evento atmosférico (Huracán María de categoría 5) que provocó el daño de la mayoría de las estaciones meteorológicas. Además, el evento fue uno extremo que provoca un comportamiento anómalo y la falta de muchos datos. Esto afectaría la

visualización de los resultados de manera sustancial por lo que se decidió extraer del análisis el 2017.

Para suplementar el análisis de entradas y salidas de agua en el área de estudio, la Figura 12 muestra la media anual de evapotranspiración real en balance hídrico. La línea de tendencia tiende a valores disminuyendo progresivamente. El valor de R^2 es muy cercano a 0, por lo que no presenta un patrón muy marcado. Igualmente existe una variabilidad interanual considerable que puede deberse a ciclos y variables que interactúan en el modelo. En la sección de Cartografía es notable ver la importancia del Bosque El Yunque para el ciclo hidrológico de la zona, con los valores más bajos en déficit de balance hídrico y los más bajos en evapotranspiración real.

I. Estadísticos Zonales

Los mapas de estadísticos zonales se realizaron en ArcGIS Pro utilizando el área de estudio y el valor de la media de los rasters resultantes de la evapotranspiración real y deficiencia anual. Se realiza el estadístico sobre las 3 zonas de cuencas hidrográficas, la simbología se ajusta a tipo de extensión de corte en porcentajes. En este análisis de la Figura 13 es notable ver una tendencia que en la gráfica no se visualiza. Si bien se nota una tendencia negativa en AET (valores rojos), es notable ver cómo la cuenca al oeste a través de las décadas se queda estable en valores bajos mientras la cuenca al sureste del área de estudio se mantiene con los valores más altos en AET. La cuenca hidrográfica que tiene sus ríos desembocando al Océano Atlántico, al noreste del AOI, es la que fluctúa a través de las décadas y probablemente la que provoca los picos y bajadas en el gráfico con los mismos valores (Figura 12). Queda claro cómo se

ordenan las cuencas con estos valores, probablemente la orografía de la zona provoca que la cuenca al noreste se mantenga intermitente por la cercanía al mar, la orografía de la zona y la orientación respecto a los vientos que traen lluvias. Esta cuenca es la más afectada por los cambios en patrones de precipitación de la zona y los vientos alisios del noreste. El efecto orográfico en Puerto Rico debido a las montañas, específicamente la zona de la Sierra de Luquillo, parte del área de estudio, es significativo. Estas cadenas de montañas sirven de barreras a los vientos alisios que provienen del noreste y causan el umbral de lluvia en la región sur. En esta región, cuando los vientos predominan del sur-sureste y la humedad es alta, en las laderas sur el fenómeno también ocurre. Las partes interiores sur y este de Puerto Rico se caracterizan por un índice de concentración de precipitaciones más alto, el relieve local juega un papel importante en los patrones espaciales debido al efecto de la circulación del aire por las montañas (Vélez, A. et. al, 2019)

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 (Figura 14). 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, probablemente provocando la tendencia vista en la Figura 10.

Se incluye en la sección de Cartografía de este documento, mapa del año 2021 de estadísticos zonales en cuencas y microcuencas para el año 2021.

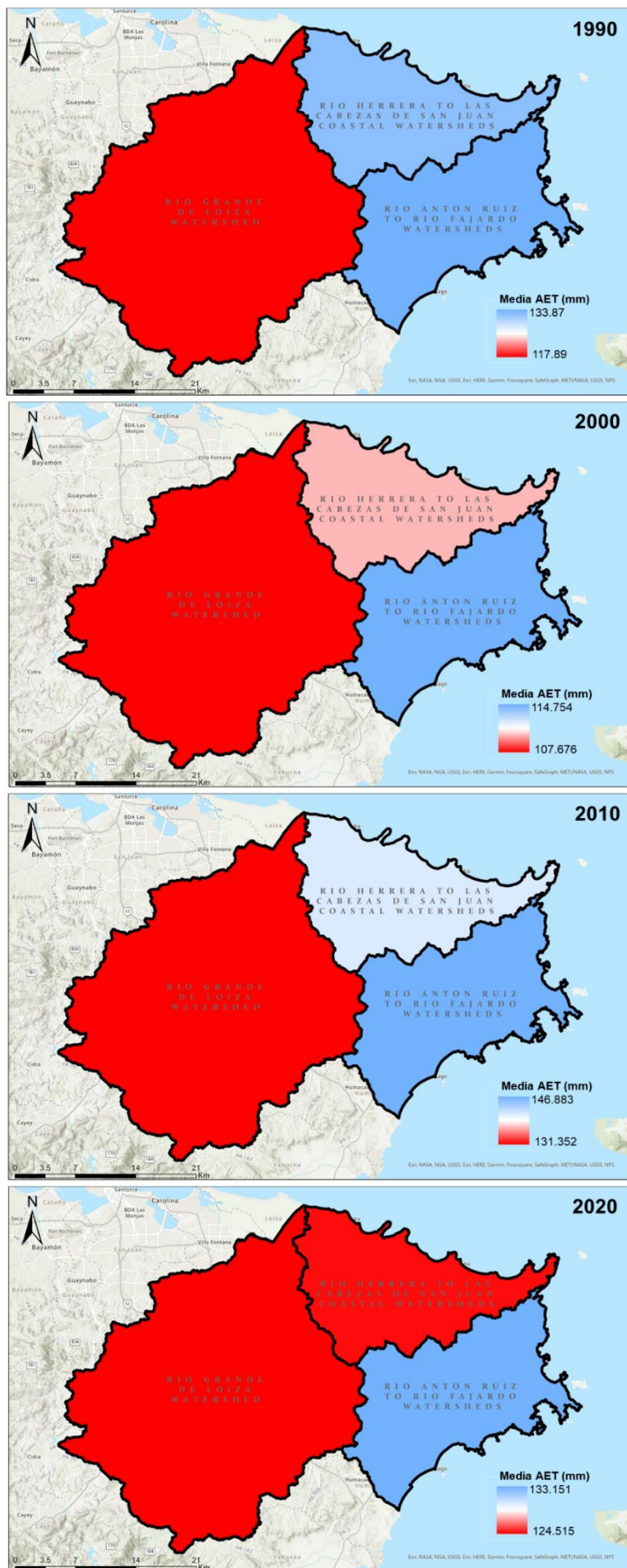


Figura 13. Mapas de estadísticos zonales con cambios en valores medios de evapotranspiración real cada década en las tres cuencas hidrográficas del AOI.

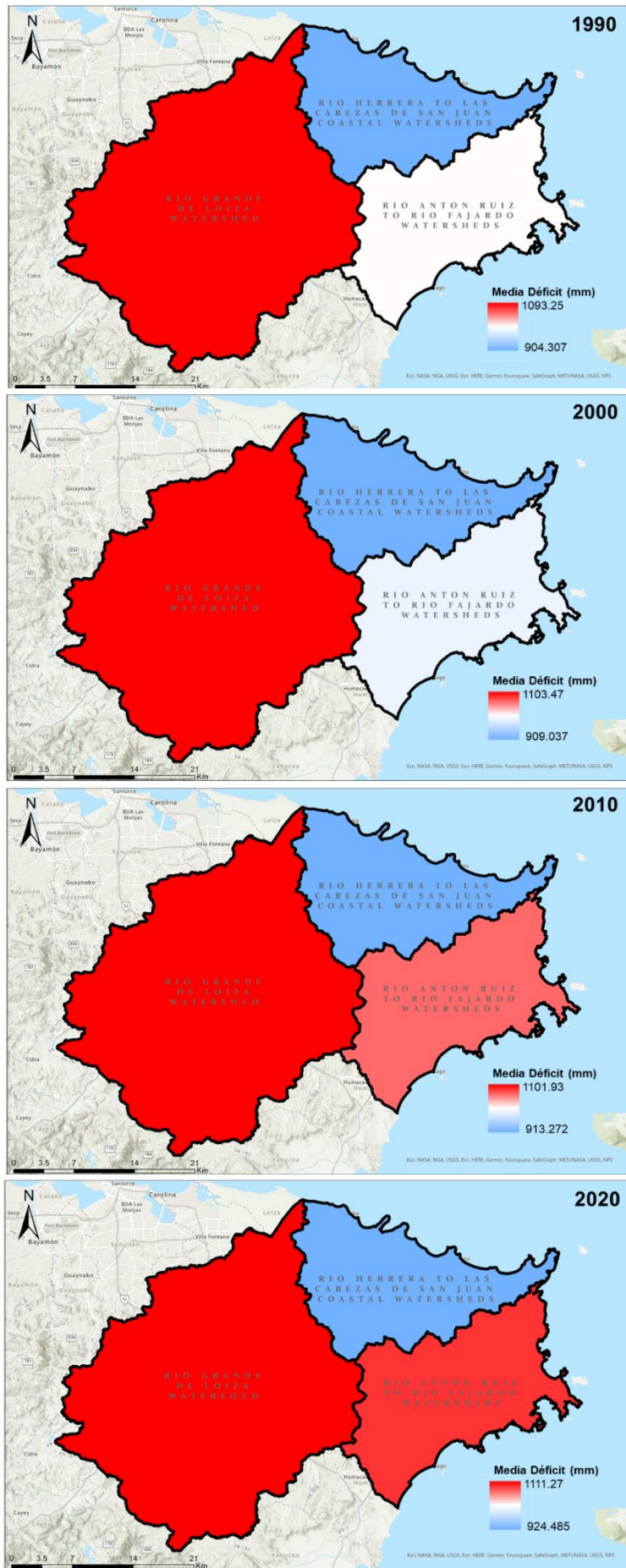


Figura 14. Mapas de estadísticos zonales con cambios en valores medios de déficit en balance hídrico cada década en las tres cuencas hidrográficas del AOI.

PRESUPUESTO

El proyecto realizado contó con un presupuesto bajo. Durante la realización del mismo no se efectuaron gastos directos y los softwares utilizados ya se contaban con ellos por tratarse de programas informáticos que el autor disponía con anterioridad. El trabajo de desarrollo e investigativo fue realizado de manera independiente con la asesoría del tutor, no se recibió paga alguna como parte de una práctica o trabajo que no fuera meramente académico. Aun así, se detalla en la siguiente Tabla 6 el coste de cada herramienta utilizada con gastos estimados de lo que podría costar (o pudo haber costado) la realización del proyecto.

Herramienta	Tipo	Tiempo de uso	Cantidad	Precio
ArcGIS Pro	Software	1 año	1	\$100
Python 3			1	\$70
Microsoft Excel			1	\$1 000
CORE 7i 8th Gen, 16GB RAM Laptop	1		\$80	
Disco duro externo 1TB				
Total				\$1 250

Tabla 6. Presupuesto estimado para realización del trabajo.

La tabla de costos anterior va acompañada del recurso humano que en este caso fue una sola persona con asesoría por el período de 1 año académico. Los valores en la tabla anterior son estimados y un supuesto de lo que ya el autor disponía por equipo. El computador descrito contiene las especificaciones recomendadas para la ejecución de los modelos desarrollados.

CONCLUSIONES

Los objetivos principales planteados en el trabajo se han cumplido. Se ha desarrollado una automatización que calcula modelos de balance hídrico a través de Python y GIS. Además, se ha podido probar el código con el caso en el área de estudio de las cuencas hidrográficas en el noreste de Puerto Rico. Luego de culminado el proyecto se consta del código automatizado de cálculo de balance hídrico, el estudio y análisis de cambios en balance hídrico por variaciones climáticas en cuencas hidrográficas en Puerto Rico y de una base de datos geoespacial con los resultados de excedentes, deficiencias y evapotranspiración real para cada año entre 1990 a 2021.

Tener un código automatizado ayudó a que el análisis temporal fuera extenso, alcanzando los 32 años, periodo un poco más largo de lo planteado en una propuesta inicial. Esto ocurrió gracias a que la automatización permitió un avance a producir resultados de cada año con un tiempo de máquina de aproximadamente 2 horas. Los resultados obtenidos del caso de estudio se alinean bastante con lo esperado. Si bien se esperaba una tendencia un tanto más clara en los escenarios de excedentes, el déficit muestra un patrón positivo, similar a lo planteado en una hipótesis. La diversidad de variables que interactúan en el modelo pudiera evitar una tendencia más clara. El trabajo realizado provee unos beneficios tecnológicos para la disciplina y unos resultados que aportan información importante a estudios ambientales e hidrológicos, aplicables en futuros esfuerzos a partir del proyecto.

I. Futuros esfuerzos

A partir de los resultados del trabajo se puede continuar desde dos ámbitos. El primero pudiera ser la utilización del código desarrollado para aplicarlo a otras áreas de estudio

y con otros datos. Es importante recalcar que el script está desarrollado para trabajar de mejor manera con áreas tropicales, húmedas y con temporada de crecimiento (“growing season”) durante todo el año. Los parámetros que están configurados en las herramientas se pueden editar, aunque es recomendado que no se haga porque siguen una metodología preestablecida. Se debe seguir la guía de creación de base de datos y estructura de datos expuesta en apartados anteriores de este documento para el funcionamiento correcto del modelo automatizado y reproducir una metodología similar. Es recomendable además la disponibilidad de espacio en disco, el código genera muchos datos intermedios durante su cálculo que pueden llegar a los 3.9 GB. El código se añade como anexo del trabajo para la utilización de este en futuras aplicaciones. Otro ámbito para seguir que aporta el trabajo es la creación de conjuntos de datos en una base de datos geoespacial en formato gdb disponible para estudios futuros. Esta base de datos, que se ofrecerá como datos abiertos, ofrecerá capas de información que pudieran utilizarse para investigaciones posteriores. Las capas de evapotranspiración real (AET) son de una escala bastante pequeña (30m), datos no disponibles de manera accesible para esta área de Puerto Rico. Al tratarse de un área muy estudiada, pues son las cuencas que aportan agua al Bosque del Yunque, las capas de información de déficits, excedentes y evapotranspiración real son un buen aporte científico para futuros esfuerzos de conservación. Una futura línea de investigación sería realizar el mismo trabajo, pero con un área de estudio que incluya toda la isla grande de Puerto Rico. Para esto no habría que cambiar nada de la lógica aplicada más allá de tener una capa AOI que sea de la extensión completa de la isla grande. Para esto se requeriría una máquina más potente

que pueda ejecutar el código desarrollado para la misma resolución con una extensión más grande. Al tratarse de muchos cálculos y procesos, para tener resultados anuales y el tiempo de máquina no sea demasiado excesivo, se requiere un equipo de hardware con más capacidades. Sería interesante ver el cambio en balance hídrico para toda la Isla variando patrones climáticos, estos ya disponibles para el caso aplicado.

II. Impacto de trabajo

Además de lo mencionado en la sección anterior de futuros esfuerzos, que se enfatiza posibles impactos positivos que pudieran tener, tanto tecnológicos, a la disciplina y medioambientales, se recalca la importancia de estudios como estos en la coyuntura ambiental actual de la zona trabajada.

Además de la evidente importancia del agua como para toda sociedad, tanto de vitalidad, agricultura, paisaje y ambiental, en Puerto Rico es crucial para la economía ya que potencia industrias tales como farmacéuticas. Cuando deja de caer lluvia por unos días, se visibiliza la importancia del recurso. Según el Atlas del Bosque Nacional del Yunque del Servicio Forestal de Estados Unidos, el agua que corre por los ríos de este bosque está documentada como la más limpia de la isla con condiciones de alta calidad. Según el mismo documento, en 2014, Puerto Rico tenía 3.5 millones de habitantes, de los cuales alrededor del 20% depende del agua que abastece el Bosque Nacional El Yunque. Los resultados de la tendencia en aumento en el déficit de agua en las cuencas que alimentan el bosque 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, así como el mejor manejo de los recursos hídricos. En conclusión, 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.

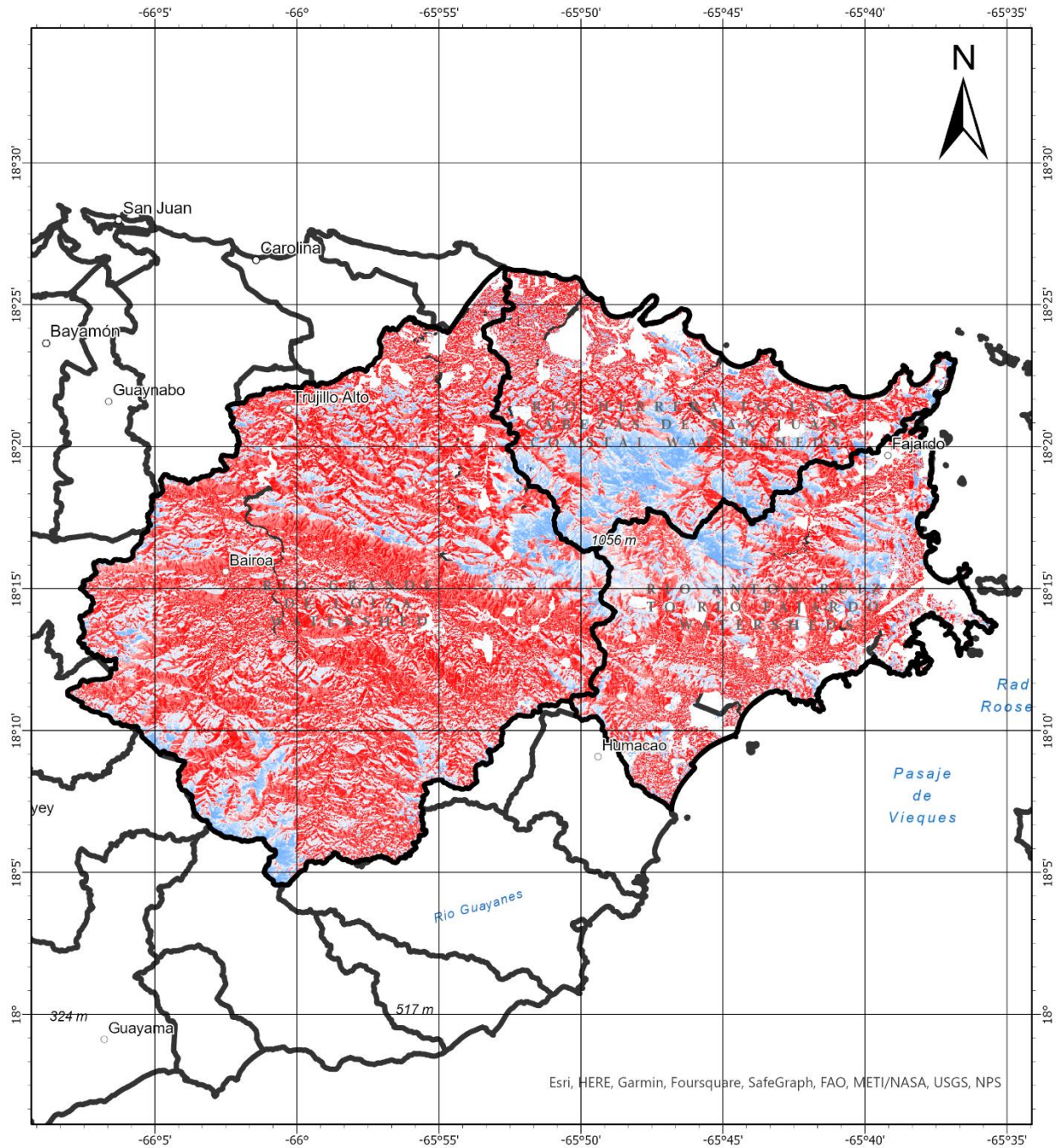
DISCUSIÓN

El trabajo provee una herramienta importante para la automatización de cálculos de balance hídrico, no obstante, los resultados del estudio de caso con el que se prueba el código deja abierta una discusión interesante. Es crucial reconocer que estudios sobre recursos hídricos representan una de las prioridades científicas y sociales en la actualidad. Al estudiar un área compuesta por tres cuencas hidrográficas muy importantes para todas las islas de Puerto Rico y la región, los resultados pueden representar una tendencia notable de la disponibilidad y almacenamiento de agua y cómo ha ido cambiando en las últimas décadas por cambios en patrones climatológicos. Si nos dejamos llevar estrictamente por los resultados obtenidos en este trabajo, especialmente el déficit de agua en las cuencas ha ido aumentando progresivamente y una posible tendencia a disminución en exceso, como se ha explicado en secciones anteriores. Esto ocurre analizando solo cambios en la cantidad de lluvia que cae en el área y los cambios en temperaturas, cambios estrictamente climáticos. Aunque el enfoque del trabajo es este, investigar si existe relación entre estos cambios y el balance hídrico, es importante resaltar que el uso del suelo es una variable importante para este cálculo. Durante los 32 años analizados se trabajó con un mismo modelo de elevaciones y un mismo conjunto de datos de suelo, nuevamente,

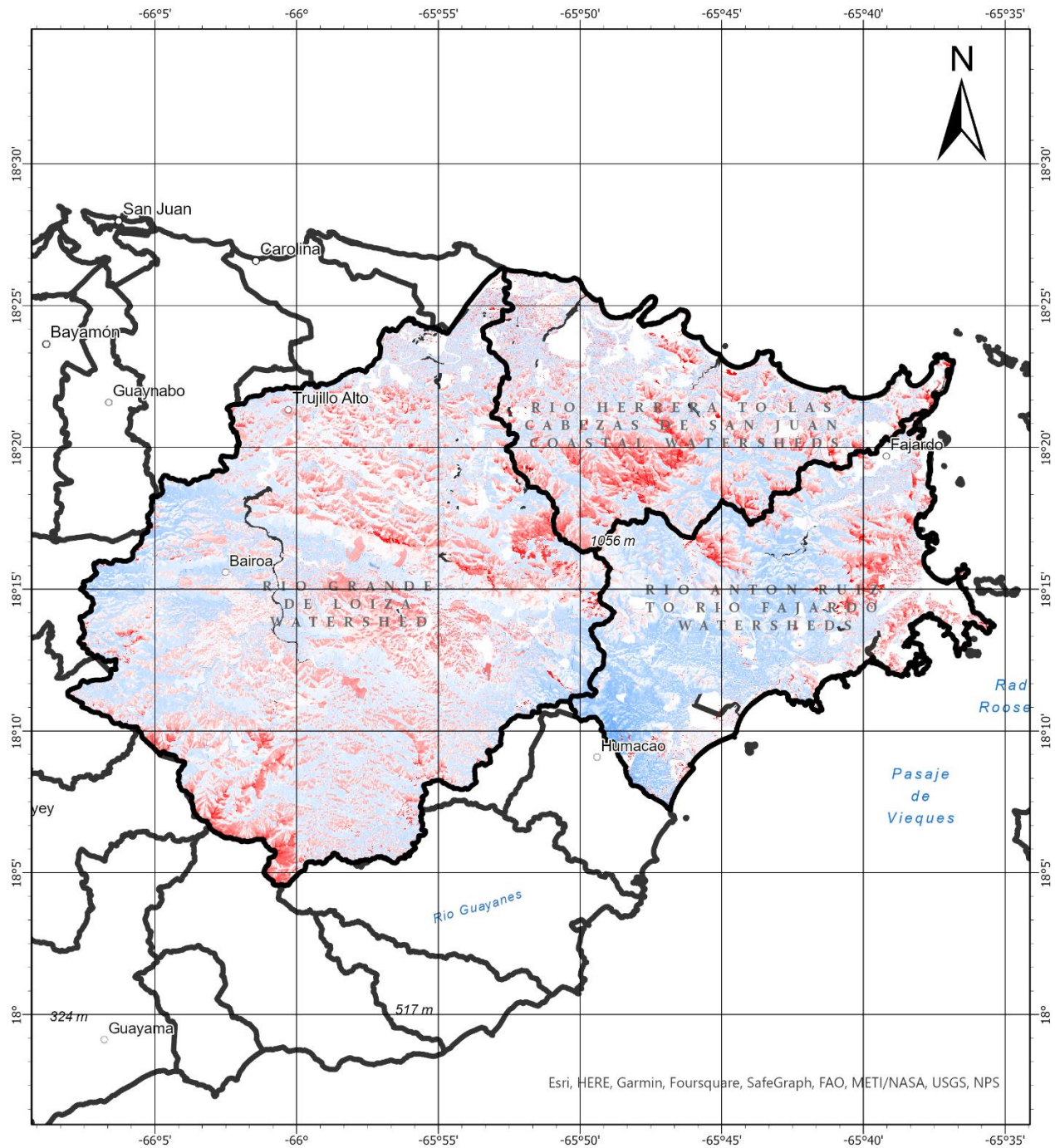
para considerar solo cambios en patrones climáticos. Es estudiado el efecto antropogénico que han ido provocando estas variaciones climáticas, y aunque nosotros claramente no controlamos la precipitación, sí podemos controlar el uso de los espacios. Puerto Rico ha pasado por varias crisis de racionamiento de agua que es a causa de la poca capacidad de recarga de sus embalses, no necesariamente por los cambios en precipitación o temperatura. La cuenca hidrográfica es toda esa superficie geográfica por la que escurrientías de agua drenan hacia un punto común, el estudio y protección de estas es vital para la sociedad. La manera más eficiente de proteger la cuenca hidrográfica es la protección y conservación de sus bosques. Es muy común en Puerto Rico hablar de dragados de los embalses en tiempos de sequía para evitar la acumulación de sedimentos (práctica que no llega más allá de la discusión meramente teórica), aun así, no es la única acción posible. Según Arturo Massol Deyá, “aspirar a mayor cobertura boscosa tiene el otro beneficio de reducir la sedimentación de los embalses. Dragar para aumentar su capacidad de almacenaje se convierte entonces en una acción complementaria. Dragar sin proteger la cuenca es una mala inversión, tiene que ir en conjunto a esa mirada a nivel de paisaje de la región.” (Massol, A., 2020). Según un análisis del biogeógrafo Alexis Dragoni, “la cobertura boscosa de la subcuenca hidrográfica de Carraizo apenas alcanza el 35%. Estos valores distan mucho de lo necesario para cuencas saludables” (Massol, A., 2020). La subcuenca de Carraizo se encuentra dentro del área de estudio. Otras cuencas al oeste de Puerto Rico tienen un porcentaje mucho mayor. De hecho, la cuenca hidrográfica dentro del área de estudio más afectada es la más que se ha ido urbanizando durante las pasadas décadas, el cambio de uso de suelo en esta dirección perjudican los esfuerzos

para contrarrestar los efectos de cambios climáticos. Por lo pronto, el Bosque El Yunque aún mantiene cierto caudal mínimo calmante para muchos, es esta emblemática extensión de terreno el que ha amortiguado el golpe en tiempos de escasez y sequía. Combinar los resultados de este trabajo, con el rol de este bosque fluvial y los cambios en cobertura boscosa cada vez más acelerados en el área, proporciona una argumentación a proponer iniciativas y decisiones de política pública enfocadas a la conservación de estas cuencas hidrográficas. Si bien se encontró un patrón a que los cambios en patrones climáticos están afectando el balance hídrico de la zona, se debe recurrir a prácticas que contrarresten esa tendencia.

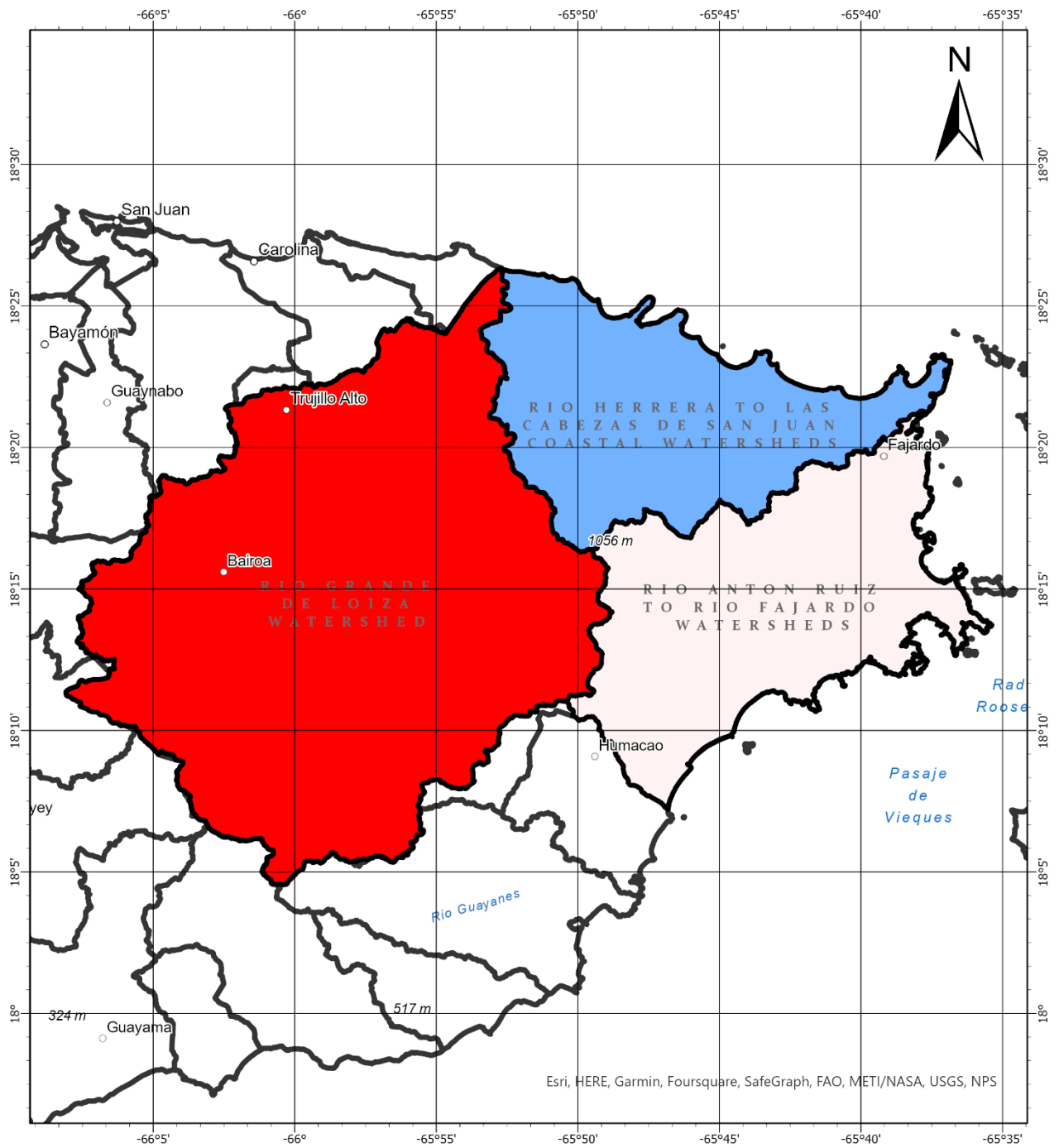
CARTOGRAFÍA



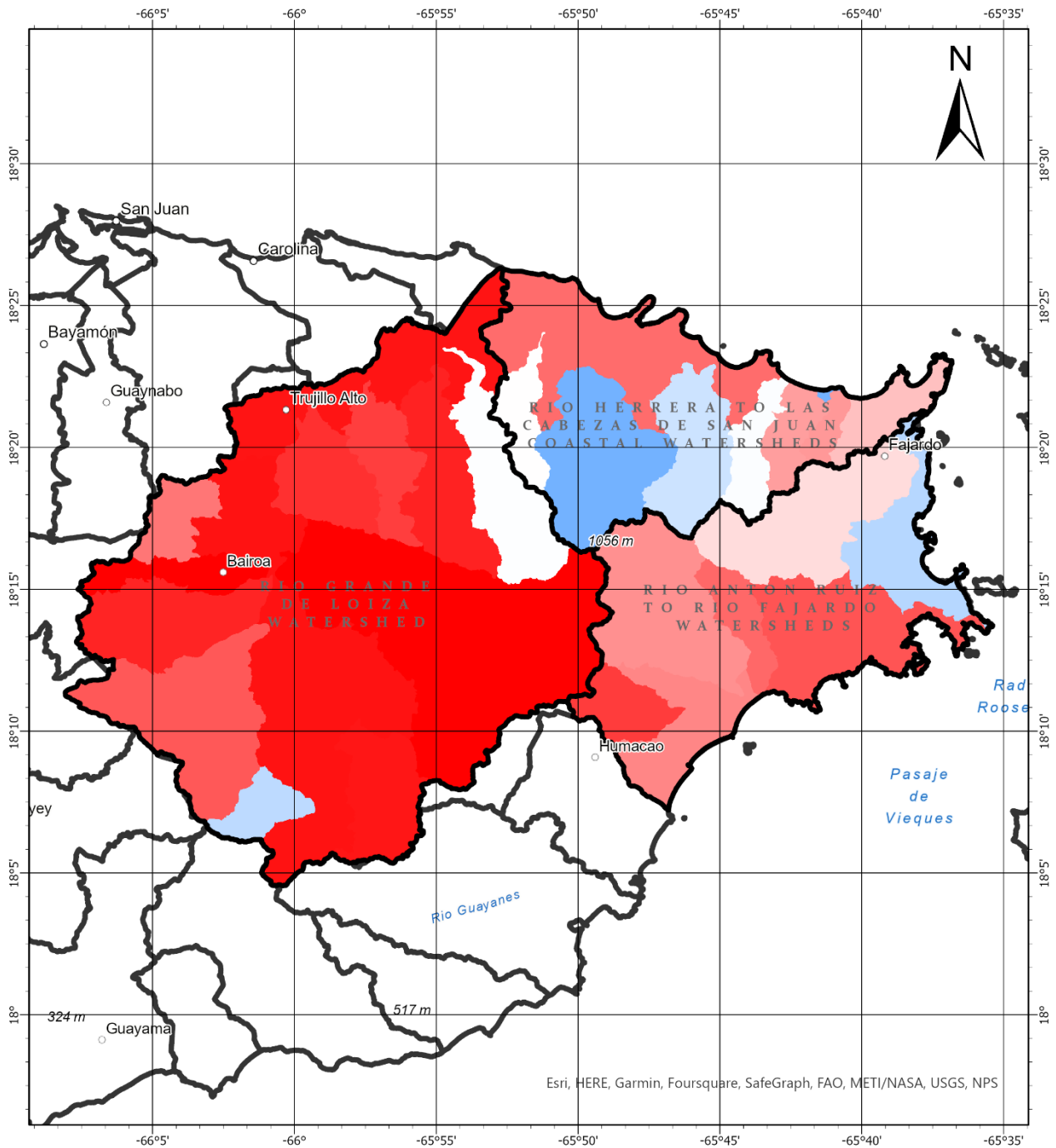
<p>Déficit en balance hídrico para 2021</p> <p>Área de estudio compuesta de cuencas hidrográficas al noreste de Puerto Rico</p>	<p>1:330 000</p> <p>0 2 4 8 12 Km</p>	<p>Déficit (mm)</p> <p>3172.72</p> <p>-98.4071</p> <p>■ Cuencas hidrográficas (AOI)</p> <p>■ Municipios</p>
<p>Autor: Wilfredo A. García López</p> <p>Fecha: junio 2022</p>	<p>GCS North American 1983</p> <p>North American 1983 Degree</p>	<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA</p>



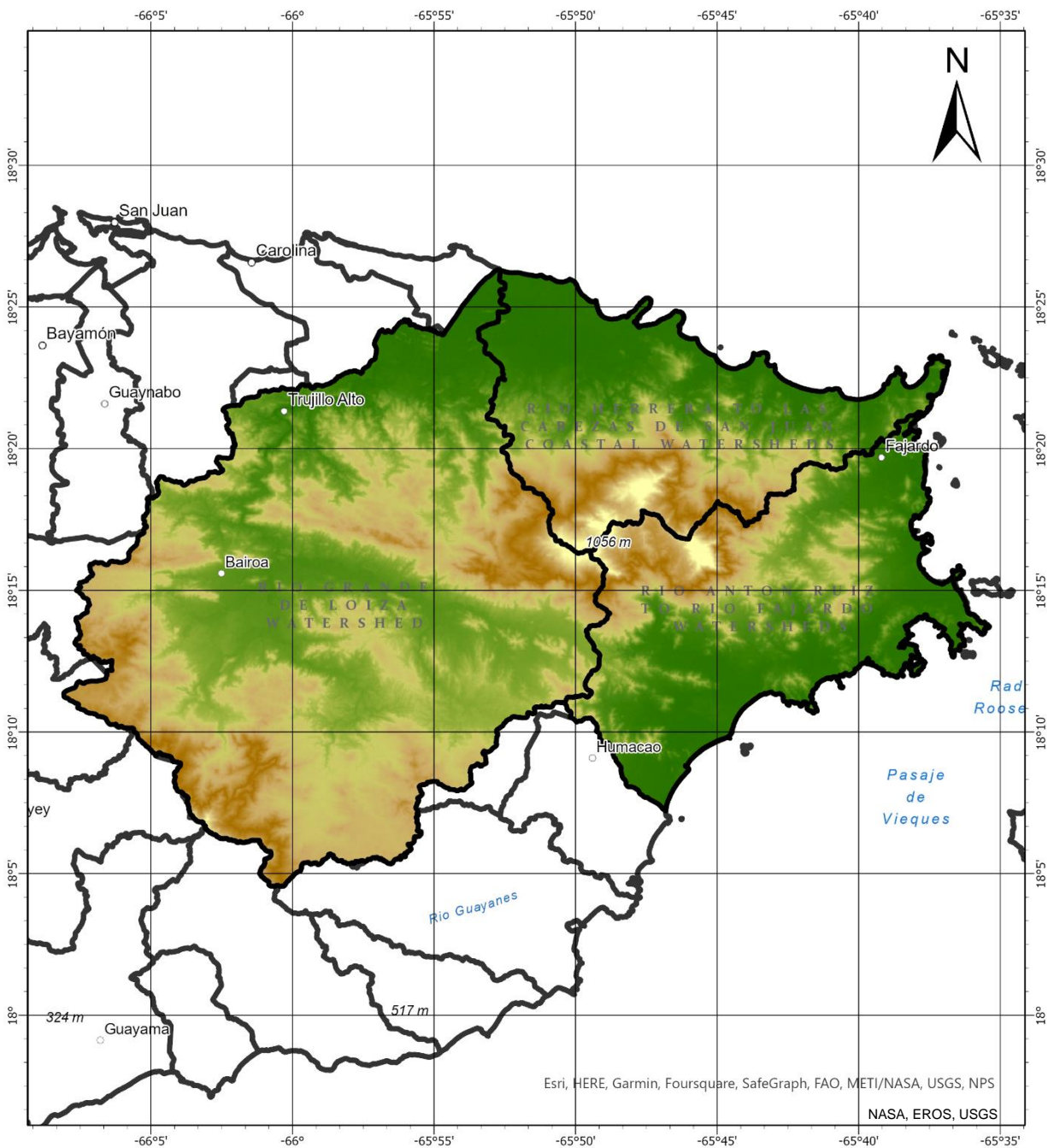
<p>Evapotranspiración real para 2021</p> <p>Área de estudio compuesta de cuencas hidrográficas al noreste de Puerto Rico</p>	<p>1:330 000</p>	<p>AET (mm)</p> <p>401.041</p> <p>3.6281</p> <p> </p>
<p>Autor: Wilfredo A. García López Fecha: junio 2022</p>	<p>GCS North American 1983 North American 1983 Degree</p>	<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA</p>



<p>Estadístico zonal de media en déficit en balance hídrico para cuencas en 2021 Área de estudio compuesta de cuencas hidrográficas al noreste de Puerto Rico</p>	<p>1:330 000</p>	<p>Media Déficit (mm)</p> <p> <input type="checkbox"/> Cuencas hidrográficas (AOI) <input type="checkbox"/> Municipios </p>
<p>Autor: Wilfredo A. García López Fecha: junio 2022</p>	<p>GCS North American 1983 North American 1983 Degree</p>	<p> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA </p>



<p>Estadístico zonal de media en déficit en balance hídrico para microcuencas en 2021 Área de estudio compuesta de cuencas hidrográficas al noreste de Puerto Rico</p>	<p>1:330 000</p> <p>0 2 4 8 12 Km</p>	<p>Media Déficit (mm)</p> <p>1158.72 629.201</p> <p> Microcuencas hidrográficas (AOI) Municipios </p>
<p>Autor: Wilfredo A. García López Fecha: junio 2022</p>	<p>GCS North American 1983 North American 1983 Degree</p>	<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA</p>



<p>Modelo digital de elevaciones</p> <p>Área de estudio compuesta de cuencas hidrográficas al noreste de Puerto Rico</p>	<p>1:330 000</p> <p>0 2 4 8 12 Km</p>	<p>DEM (m)</p> <p>1048 -14</p> <p> Cuencas hidrográficas (AOI) Municipios </p>
<p>Autor: Wilfredo A. García López Fecha: junio 2022</p>	<p>GCS North American 1983 North American 1983 Degree</p>	<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA</p>

BIBLIOGRAFÍA

- Dieter, C., Maupin, M., Caldwell, R., Harris, M., et. al (2018) Estimated Use of Water in the United States in 2015. Reston, VA: USGS Water Availability and Use Science Program
- Dyer, J. (2009) Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecol.* 24, 391-404
- 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. (2013). A GIS-Based Water Balance Tool to Quantify Ecological Variation in Complex Terrain. [Poster presentation]. AAG Annual Meeting, Los Angeles, CA.
- 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.
- Quiñones, Maya; Parés-Ramos, Isabel K.; Gould, William A.; Gonzalez, Grizelle; McGinley, Kathleen; Ríos, Pedro. (2018). El Yunque National Forest Atlas. Gen. Tech. Rep. IITF-GTR-47. San Juan, PR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 63 p. doi: <https://doi.org/10.2737/IITF-GTR-47ES>
- 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.
- Quiñones, F., Torres, S. (2012) El Clima de Puerto Rico. Recursos de Agua de Puerto Rico
- Machiwal, D., Jha, M. (2015) GIS-based water balance modeling for estimating regional specific yield and distributed recharge in data-scarce hard-rock regions. *Journal of Hydro-environment Research.* 9 (4). 554-568 doi: 10.1016/j.jher.2014.07.004
- Martínez-Austria, P., Patiño-Gómez, C. (2012) Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3 (1), 5-20

- Massol, A. (2020) Agua, Racionamiento y Economía Forestal, *Ciencia para la insurgencia* (pp. 32). Ediciones Callejón
- Massol, A. (2020) Al Agua, Pecho, *Ciencia para la insurgencia* (pp.37). Ediciones Callejón
- Mecikalski, J., Harmsen, E. (2019) The Use of Visible Geostationary Operational Meteorological Satellite Imagery in Mapping the Water Balance over Puerto Rico for Water Resource Management. *Satellite Information Classification and Interpretation*. doi: 10.5772/intechopen.82460
- Nieto-Diaz, J., Lerner, DN., Saul, AJ., Blanksby, J. (2012) GIS Water-Balance Approach to Support Surface Water Flood-Risk Management. *Journey of Hydrologic Engineering*, 17 (1). doi: 10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000416
- Rabot, E., Weismeyer, M., Shlüter, S., Vogel, H. (2018) Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*. 314:122-137 doi: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009
- Rich, P. (1994) Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *Am. Soc. Photogram. Remote Sens.* 4
- Rich, P. (1995) Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*.9:4, 405-419. doi:10.1080/02693799508902046
- Rohli, R., Vega, A. (2012). Global Hydrologic Cycle and Surface Water Balance, *Climatology* (pp. 104-123). Jones & Bartlett Learning.
- Samper, J., Alvares, D., Pisani, B., García, MA. (2007) Evaluación del Efecto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos en la Cuenca Hidrográfica del Ebro con GIS-BALAN. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 8.
- Stephenson, N. (1990) Climatic Control of Vegetation Distribution: The Role of the Water Balance. *The American Naturalist*, 135 (5), 649-670
- Tool Reference* (s.f.) Esri ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>

UC Centro Interdisciplinario de Cambio Global. (2013). Actualización del Balance Hídrico Nacional Considerando Cambio Climático: Diagnóstico. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas

Vélez, A., Martin, J., Royé, D., Santaella, O. (2019) Spatial Analysis of Daily Precipitation Concentration in Puerto Rico. *Theoretical and Applied Climatology*. 136:1347-1355. doi: 10.1007/s00704-018-2550-1

Wetzel, R. (2001) Water Economy: Global Water Balance, *Limnology: Lake and River Ecosystems* (pp. 43-48). Academic Press.

Wypych, A. (2013) Using GIS Methods in Spatial Modelling of Climatic Water Balance Index. *GI_Forum Creating the GISociety - Conference Proceedings*, 1, 147-156 doi:10.1553/giscience2013