
GENERACIÓN DE RED HIDROGRÁFICA DENSA DE REPÚBLICA DOMINICANA A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE RESOLUCIÓN MEDIA

DENSE DRAINAGE NETWORK GENERATION OF THE DOMINICAN REPUBLIC BASED ON A MEDIUM-RESOLUTION DIGITAL ELEVATION MODEL

PREPUBLICACIÓN - PREPRINT

José-Ramón Martínez-Batlle

✉ <https://orcid.org/0000-0001-9924-0327>

Facultad de Ciencias

Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)

Santo Domingo, República Dominicana

joseramon@geografiafisica.org

Michela Izzo Gioiosa

✉ <https://orcid.org/0000-0003-4835-3967>

Directora Ejecutiva

Guakia Ambiente

Santo Domingo, República Dominicana

michela.izzo@guakiambiente.org

22 de septiembre de 2023

Resumen

La administración eficiente de recursos hídricos es crucial, especialmente en países que comparten islas, como República Dominicana. No obstante, la gestión de estos recursos a menudo se ve limitada por la falta de información precisa y detallada sobre la red hidrográfica. A pesar de que existen múltiples fuentes de información geográfica sobre la hidrografía del país, éstas presentan limitaciones en términos de resolución, cobertura y consistencia. En este trabajo presentamos una red hidrográfica densa, y sus correspondientes cuencas, obtenidas tras aplicar algoritmos reproducibles de hidrología computacional a un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de resolución media de República Dominicana. Extrajimos estadísticos sobre la morfotopografía y variables hortonianas, y caracterizamos las corrientes y cuencas en función del orden de red de forma consistente. Los resultados evidenciaron patrones hasta ahora desconocidos sobre la hidrografía, que responden en gran medida a la distribución de la litología, las estructuras tectónicas, la geomorfología y, posiblemente, a variables climáticas. A pesar de limitaciones como la variabilidad en precisión posicional y la falta de datos completos en llanuras, nuestro resultado tiene buena precisión en áreas de montaña y piedemonte y, al mismo tiempo, generamos una contribución metodológica y de producción de datos relevante. Nuestro trabajo constituye un aporte significativo a la geografía física dominicana, y sienta un precedente en la aplicación de técnicas de hidrología computacional. Con la combinación de datos, protocolos y análisis, destaca la trascendencia de la investigación, aportando herramientas valiosas para futuras aplicaciones prácticas y científicas.

Palabras clave modelo digital de elevaciones · análisis hidrológico · procesamiento de datos geoespaciales · hidrología computacional

Abstract

Efficient water resource management is crucial, especially in countries that share islands, such as the Dominican Republic. However, the management of these resources is often hindered by a lack of precise and detailed information about the hydrographic network. Although there are multiple sources of geographical information on the country's hydrography, they have limitations in terms of resolution, coverage, and consistency. In this study, we present a dense hydrographic network and its corresponding basins, obtained after applying reproducible computational hydrology algorithms to a medium-resolution Digital Elevation Model (DEM) of the Dominican Republic. We extracted statistics on morphotopography and Hortonian variables, and characterized the streams and basins based on network order consistently. The results revealed previously unknown patterns in the hydrography, largely responding to the distribution of lithology, tectonic structures, geomorphology, and possibly climatic variables. Despite limitations such as variability in positional accuracy and the lack of complete data in plains, our result is highly accurate in mountain and foothill areas, while also making a significant methodological and data production contribution. Our work represents a significant addition to Dominican physical geography and sets a precedent in the application of computational hydrology techniques. Combining data, protocols, and analysis, the importance of this research is highlighted, providing valuable tools for future practical and scientific applications.

Keywords Digital Elevation Model · hydrological analysis · geospatial data processing · computational hydrology

1. Introducción

El agua es un recurso crítico, que impulsa la economía y sostiene la vida. A nivel global, pero especialmente en países que comparten islas pequeñas, como República Dominicana (RD), la administración eficaz de este recurso es esencial (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017; Roson, 2013). Sin embargo, la gestión eficiente de los recursos hídricos puede verse limitada por la falta de información precisa y completa sobre la red hidrográfica. En este contexto, las fuentes actuales de información geográfica, a pesar de su valor, presentan limitaciones en cuanto a su resolución, cobertura y consistencia.

La red hidrográfica de RD digitalizada a partir del mapa topográfico nacional a escala 1:50,000 ("MTN-50k") (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989) ofrece una cobertura extensa pero carece de los detalles necesarios para apoyar el análisis hidrológico. Por otro lado, los estudios técnicos y multitemáticos de ámbito subnacional desarrollados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) de RD y otras entidades y autores, aunque son valiosas fuentes de información, utilizan metodologías diversas, lo que limita la consolidación de una red hidrográfica coherente a nivel nacional (CIDIAT y INDRHI, 1992; Halcrow-COR Ing. S.A., 2002; INDRHI, 1996, 2012; INDRHI y AQUATER, 2000; INDRHI y EPTISA, 2000; Martínez-Batlle, 2019; Martínez-Batlle, 2019a; OEA y INDRHI, 1994; Rodríguez y Febrillet, 2006; Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002).

Adicionalmente, las redes hidrográficas derivadas de modelos digitales de elevaciones de baja resolución, como el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 3 arco-segundos, normalmente presentan artefactos de difícil depuración, además de que la longitud de los canales es siempre más corta que la verdadera, resultando en redes poco densas (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey, 2009). Por otro lado, el DEM SRTM de 1 arco-segundo (~30 metros) garantiza la precisión mientras aumenta el detalle de elevación y parece ser una de las fuentes más consistentes actualmente (Aziz y Rashwan, 2022). No obstante, nosotros hemos generado productos hidrográficos con SRTM-DEM de 30 metros, y notamos que el nivel de detalle de la red es bastante mejorable, sobre todo en áreas de montaña.

Desde 2014, Alaska Satellite Facility (ASF) inició la creación de productos ALOS-PALSAR corregidos radiométricamente en función del terreno (RTC), con el objetivo de mejorar la geometría y la radiometría—coeficiente de retrodispersión por unidad de superficie del frente de onda incidente, también conocido como *gamma-nought*, γ^0 —de las imágenes generadas por el sensor PALSAR (radar de apertura sintética, banda L, con distintas polarizaciones y modos de barrido) montado a bordo del satélite ALOS de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015). ALOS fue lanzado en 2006, pero

74 luego de cinco años de servicio, perdió energía y cesó la comunicación con el centro de control, aunque aún permanece en órbita.

75 Para obtener los productos RTC, denominados propiamente como “*Hi-Res Terrain Corrected*” o “ALOS PALSAR RTC”, ASF requirió de datos globales de elevación de la máxima resolución posible, para lo cual empleó de forma preferente (según territorios) el SRTM de 1 arco-segundo. En el proceso fue necesario ajustar el espaciado de píxeles del DEM fuente (~30 metros) para hacerlo coincidir con el espaciado de píxel de las imágenes ALOS PALSAR (~ 12.5 metros) usando una función de remuestreo (*up-sampling*), obteniéndose así un DEM de 12.5 metros (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015).

82 A pesar de que ASF advirtió que este DEM se empleó únicamente para realizar la corrección radiométrica del terreno del producto derivado de ALOS-PALSAR, y que no debería ser utilizado como fuente de elevación precisa (ASF DAAC, 2014), lo cierto es que en países donde no se dispone de DEM de mediana o alta resolución, se vuelve crucial indagar en el potencial de cada nuevo producto disponible. Por esta razón, tras varias pruebas iniciales en las que extrajimos redes de drenaje y elementos del relieve a partir de este DEM, comprobamos que la red hidrográfica obtenida tenía mucho mayor detalle que las redes generadas con cualquier otra fuente disponible. Dado que la elevación precisa no es crucial en nuestras aplicaciones, vimos un alto potencial en este DEM para realizar aplicaciones de hidrología computacional, en concreto para la extracción de redes densas con énfasis en áreas de montaña.

91 El propósito de este artículo es ofrecer nuevos datos hidrográficos para superar las limitaciones de las fuentes cartográficas existentes, generando una red densa de ríos, arroyos y cañadas—canales, talwegs—, acompañada de una delimitación exhaustiva de cuencas hidrográficas, con énfasis en áreas montañosas—donde las fuentes actualmente disponibles suelen mostrar una red dispersa—, utilizando como fuente el DEM servido con los productos ALOS PALSAR RTC de 12.5 metros de resolución espacial. Nuestro segundo objetivo es optimizar el DEM, reduciendo el ruido y asegurando su precisión hidrológica, a la vez que mantenemos los elementos morfológicos significativos del terreno. Nuestro tercer objetivo, de igual importancia, es sistematizar el protocolo de procesamiento y análisis, creando una metodología explícita y completamente reproducible, que se traduce en una base de código abierto para el manejo de datos de elevación e hidrología computacional, disponible para su uso por estudiantes e investigadores interesados en aplicarlo a datos similares.

101 Nuestro trabajo tiene potencial para suplir las demandas de información sobre hidrografía de resolución fina, que es un aspecto crucial en muchos estudios de modelación, análisis de riesgos, morfometría de cuencas, entre otros. De manera particular, la hidrografía densa generada por nosotros es idónea para mejorar la red estaciones hidrométricas del país, la cual es limitada y afronta diversos desafíos de densidad de puntos y de operación, un común denominador en este tipo de redes globalmente. Nos enfocamos en la utilidad de una hidrografía sistemáticamente generada, no necesariamente en las métricas precisas, pues el modelo digital de elevaciones usado tiene error, y la información de terreno necesaria para conducir el flujo en áreas llanas, es insuficiente. Asimismo, nuestro trabajo también podría contribuir a aportar información para acciones de conservación, planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional (Burn, 1997; INDRHI, 2019; Mishra y Coulibaly, 2009; Mishra y Coulibaly, 2010). Además, los datos generados pueden ser de gran valor para un amplio rango de aplicaciones, incluyendo la planificación del uso del suelo, el diseño de infraestructuras, la gestión de cuencas hidrográficas y la modelización de escorrentía y erosión. A medida que nos enfrentamos a los impactos del cambio climático y a la creciente escasez de agua, esperamos que este trabajo sirva como una contribución significativa para la gestión de los recursos hídricos en la República Dominicana (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer, 2017; Roson, 2013).

117 Notas sobre terminología

118 La terminología utilizada para describir los distintos componentes de los sistemas fluviales es un tema de continuo debate en el campo de la geomorfología fluvial. Este debate suele estar intrínsecamente ligado a la escala de análisis empleada; al variar la escala, incrementándola o reduciéndola, los criterios empleados para delimitar las definiciones de los elementos morfológicos, tienden a desdibujarse y/o a resultar inconsistentes (García y Ojeda, 2011). Seleccionar el término apropiado para describir la unidad topográficamente deprimida por donde fluye o por donde podría circular el agua de escorrentía, es un desafío nada despreciable. Este reto se intensifica cuando el idioma introduce distintas connotaciones para términos similares, y donde la traducción podría prestarse a confusión—tal como ocurre con *channel* y canal en inglés y español, respectivamente—(Anderson y Anderson, 2010; Charlton, 2010; Gutiérrez Elorza, 2009; Pedraza Gilsanz, 1996).

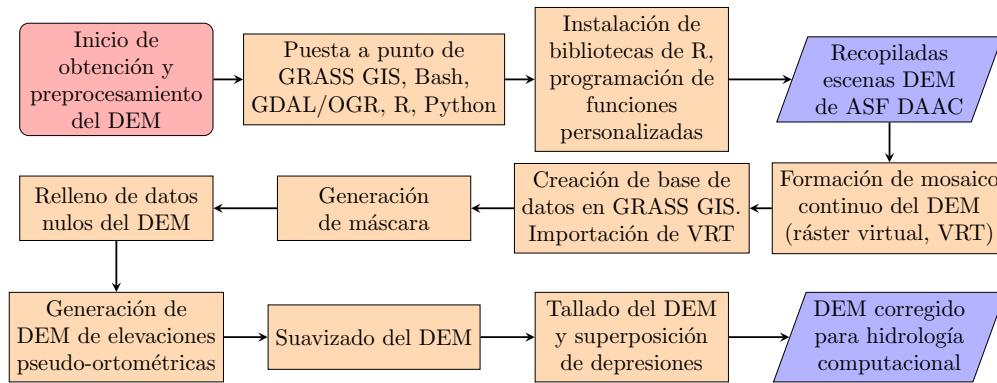


Figura 1: Resumen gráfico de la obtención y preprocesamiento del DEM

128 La resolución de las discrepancias en la terminología supera el alcance del presente trabajo, por lo decidimos
 129 fijar los términos utilizados en el artículo de manera convencional. En este estudio, empleamos los términos
 130 *talweg* y canal de forma indistinta para referirnos a la unidad topográficamente deprimida por la que fluye,
 131 o podría fluir, la corriente. En geomorfología, utilizamos la voz germánica *talweg* para referirnos a la línea
 132 imaginaria que traza la parte más baja de un valle, razón por la cual también la hemos incluido entre
 133 los términos genéricos usados (Foucault y Raoult, 1985). Es importante remarcar que nuestra definición
 134 convencional no siempre se refiere a un curso fluvial permanente, pues la circulación del agua es influenciada
 135 por múltiples factores. Asimismo, cabe destacar que, a esta unidad geomorfológica en sus distintas variantes
 136 hidrodinámicas y dimensionales, también se le conoce con múltiples nombres en República Dominicana
 137 (en orden de mayor a menor “importancia”), como son río, arroyo o cañada, denominaciones que también
 138 incorporamos en la redacción.

139 Finalmente, en nuestro en este trabajo también adoptamos los términos curso, drenaje o corriente, espe-
 140 cialmente cuando destacamos la presencia de un flujo ya sea permanente, semipermanente o intermitente.
 141 Además, para el análisis hortoniano de los sistemas fluviales, nos referimos al sistema interconectado de
 142 canales, cursos, corrientes o drenajes con las denominaciones “red de drenajes” o “red hidrográfica”.

143 2. Materiales y métodos

144 2.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

145 Iniciamos nuestro estudio valorando diversas herramientas para el procesamiento de los datos (Figura 1).
 146 Debido a la gran variedad de complementos que ofrece, junto con su alto rendimiento y la calidad de
 147 los resultados que proporciona, decidimos utilizar GRASS GIS v8.2.0 para realizar la mayor parte del
 148 preprocesamiento del DEM (GRASS Development Team, 2023). La implementación de su interfaz de
 149 línea de comandos (e.g. interfaz basada en texto), en nuestro caso Bash, garantizó la reproducibilidad de
 150 nuestros procedimientos. Nos auxiliamos también de la biblioteca GDAL/OGR, WhiteboxTools el entorno de
 151 programación estadística R y el lenguaje de programación Python (GDAL/OGR contributors, 2022; Lindsay,
 152 2018; R Core Team, 2023; Van Rossum y Drake, 2009). Nuestro enfoque de reproducibilidad asegura que, sin
 153 importar la fuente de datos empleada, el seguimiento del flujo de trabajo es viable, manteniendo la integridad
 154 y coherencia del proceso de análisis, sin menoscabo de la calidad del resultado final.

155 Asimismo, para facilitar nuestra labor, utilizamos una serie de bibliotecas de R, además de funciones
 156 personalizadas escritas por nosotros para agilizar y optimizar las tareas de limpieza y representación de datos
 157 y mapas (Hijmans, 2023; O’Brien, 2023; Pebesma, 2018; Pebesma y Bivand, 2023; Tennekes, 2018; Wickham
 158 et al., 2019; Xie, 2014, 2015, 2023; Zhu, 2021). El código reproducible usado en el estudio se puede consultar
 159 en la sección Información suplementaria, así como los repositorios creados al efecto, donde incluimos el código
 160 escrito y las direcciones para acceder a los datos fuentes, entre otras utilidades.

161 Nos centramos en la fuente de datos, que en nuestro caso es el modelo digital de elevaciones (DEM) servido
 162 con los productos *Hi-Res Terrain Corrected* de Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014). Este
 163 producto se descarga desde el Centro de Archivo Activo Distribuido del Alaska Satellite Facility o ASF
 164 DAAC—una de las instalaciones temáticas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los
 165 Estados Unidos, NASA—in forma de escenas o “cuadros” (*tiles*), conteniendo dos imágenes de retrodispersión

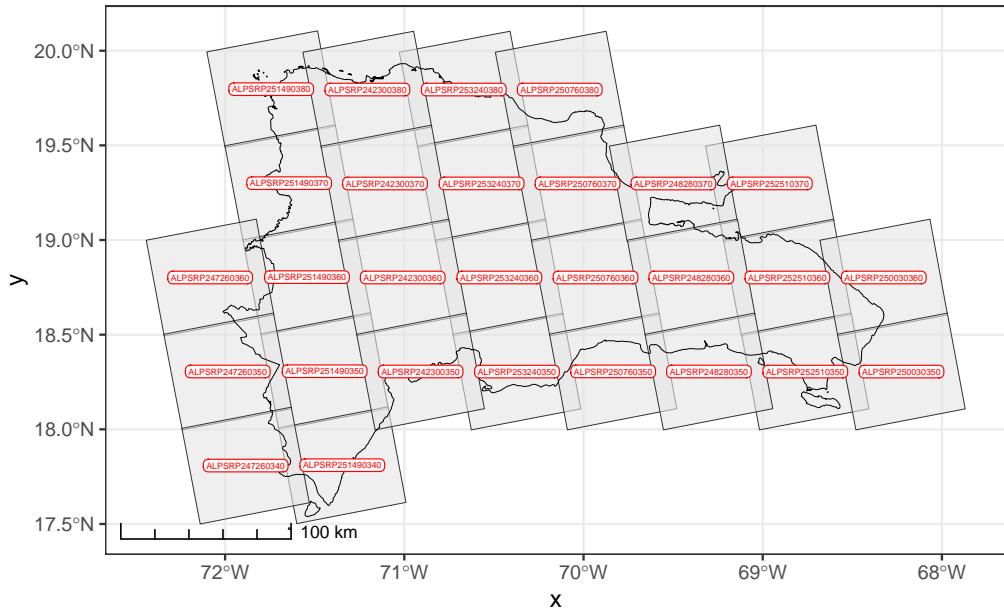


Figura 2: Mapa índice de las 28 escenas usadas en la formación del DEM de República Dominicana, superponiendo las huellas (polígono de área con datos) de las escenas ALOS PALSAR RTC sobre el límite costero e internacional del país

166 γ^0 (ca. 70x58 km cada una), una por cada polaridad, y el modelo digital de elevaciones remuestreado con el
167 que ASF realizó la corrección radiométrica de terreno (ca. 80x70 km), objeto de nuestro estudio.

168 Cabe señalar que en un estudio de Aziz y Rashwan (2022), se evaluó la precisión del DEM comparándolo con
169 otras fuentes de elevación, encontrándose un rendimiento relativamente bajo en varias pruebas. Sin embargo,
170 en el trabajo se utilizó el DEM sin preprocesar, lo cual seguramente afectó el detectado bajo rendimiento.
171 Consideramos que, a pesar de los resultados de su comparativa, la alta resolución del DEM lo convierte en
172 una excelente opción para la extracción de redes de drenaje, siempre que se apliquen filtros apropiados (Ngula
173 Niipele y Chen, 2019). Además, ASF señaló en su documentación (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF
174 DAAC, 2015) que el DEM usado en la RTC no es una fuente confiable de elevación, por lo que el resultado
175 obtenido por Aziz y Rashwan (2022) era más bien el esperado.

176 Para conformar un mosaico continuo del DEM de República Dominicana, seleccionamos y descargamos más de
177 40 escenas únicas de ALOS-PALSAR desde el ASF DAAC (JAXA/METI y ASF DAAC, 2015), minimizando
178 la redundancia espacial y eligiendo las versiones más recientes, conservando sólo 28 escenas distintas (Figura 2
179 y Tabla S1). Después, extrajimos los DEM correspondientes de los archivos comprimidos y transformamos
180 aquellos proyectos en el huso 18N al 19N del sistema UTM. Posteriormente, creamos un mosaico continuo
181 (“sin costuras”) usando el formato de ráster virtual.

182 Posteriormente, creamos una base de datos, con su correspondiente localización, en GRASS GIS, nuestro
183 software principal por su eficiencia. Ocasionalmente recurrimos a otras herramientas como WhiteboxTools y
184 QGIS, siempre con el objetivo de optimizar el uso de los recursos de hardware para obtener los resultados
185 necesarios de manera rápida (GRASS Development Team, 2023; Lindsay, 2018; QGIS Development Team,
186 2021). Complementariamente, generamos una máscara de país en QGIS, fusionando el límite oficial de la
187 Oficina Nacional de Estadística con fuentes en línea como GADM, OCHA y OpenStreetMap, y excluyendo
188 superficies de lagos naturales y embalses para facilitar el análisis de cuencas endorreicas; este paso fue realizado
189 de forma semimanual. Posteriormente, importamos tanto el ráster virtual como la máscara a la base de datos
190 de GRASS GIS (Figura S1). Inmediatamente, aplicamos la máscara a la región activa para enfocar los análisis
191 sólo dentro del área de interés. (GADM, 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018;
192 OpenStreetMap contributors, 2017; QGIS Development Team, 2021).

193 Dentro de la base de datos de GRASS, rellenamos los datos nulos del DEM (Figura S2), para luego suavizar
194 el resultado preservando morfologías con la herramienta *FeaturePreservingSmoothing* de WhiteboxTools
195 (Figura S3) (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Tras esto, combinamos el DEM suavizado con el ráster de

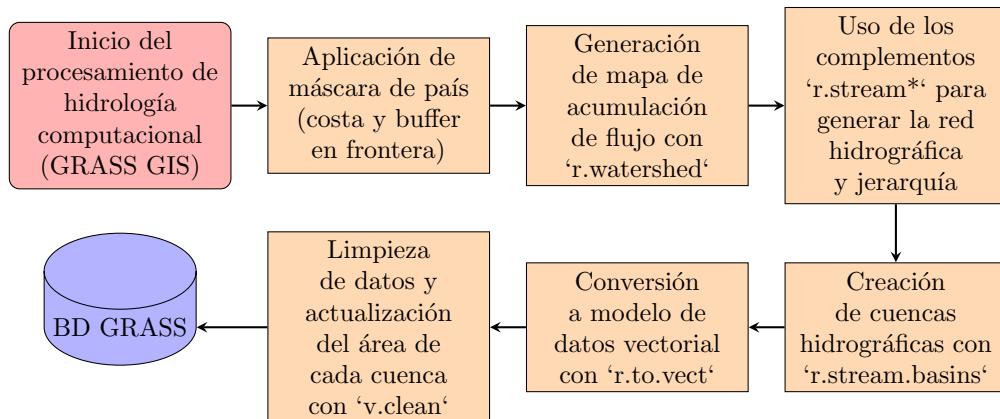


Figura 3: Resumen gráfico del procesamiento de hidrología computacional

196 altura del geoide EGM2008 mediante una simple suma algebraica para obtener alturas pseudo-ortométricas,
 197 incrementando previamente la resolución del segundo para acercarla ligeramente a la del primero.

198 A continuación, como último paso del preprocesamiento, tallamos el DEM con una red preexistente de
 199 cursos seleccionados de República Dominicana, un paso clave en la generación de la hidrografía por métodos
 200 computacionales, y que en inglés se conoce como *stream burning* (Lindsay, 2016). Primero creamos la red
 201 a partir de una selección de ríos permanentes, apoyados en imágenes satelitales (Google; Airbus, CNES;
 202 Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023), MTN-50K (Instituto
 203 Cartográfico Militar (ICM), 1989) y OpenStreetMap contributores (2017). Para representar ríos que que llenan
 204 embalses, usamos sus trazados históricos para así mantener la continuidad hidrológica (Figura S5). Luego
 205 realizamos el tallado del DEM probando tres algoritmos: **r.carve** y **r.mapcalc** de GRASS GIS, y **FillBurn**
 206 de WhiteboxTools (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022b, 2022c; Larson
 207 et al., 1991; Lindsay, 2018; Petrasova et al., 2011; Saunders, 2000; Shapiro y Westervelt, 1994). Como criterio
 208 de selección establecimos que el mejor algoritmo fuese aquel que lograra una mínima alteración en el DEM,
 209 minimizando a la vez el tiempo de cómputo. **r.carve** produjo un buen DEM tallado, aunque ocupó mucho
 210 tiempo de cómputo, por lo que no la consideramos una herramienta adecuada para iteraciones rápidas. Con
 211 **r.mapcalc** realizamos el tallado mediante una simple álgebra de mapas (normalización, operaciones booleanas,
 212 multiplicación), de donde obtuvimos un DEM poco alterado en tiempo relativamente corto. Finalmente,
 213 probamos con la función **FillBurn** de WhiteboxTools, la cual produjo un DEM tallado sustancialmente
 214 alterado respecto del original, especialmente en las áreas de karst con depresiones. Optamos por continuar
 215 nuestro flujo de procesamiento con el DEM tallado por **r.mapcalc** (ver Figura S6).

216 Finalmente, como último paso del preprocesamiento del DEM, aplicamos algoritmos para superponer
 217 depresiones al modelo, un paso esencial para dirigir la escorrentía y definir de forma coherente los límites
 218 de las cuencas y redes de drenaje. Utilizamos diversas fuentes para generar un conjunto de depresiones.
 219 Principalmente, a partir de la capa de litologías de la República Dominicana (Mollat et al., 2004), identificamos
 220 las calizas con suficiente grado de karstificación. Además, utilizamos el complemento **r.geomorphon** para
 221 crear una capa de depresiones (Jasiewicz y Stepinski, 2013) (Figura S7), y digitalizamos manualmente algunas
 222 depresiones conocidas. Finalmente, intersectamos las tres fuentes de datos para producir una capa exhaustiva
 223 de las depresiones que capturan la escorrentía superficial (Figura S8).

224 2.2. Procesamiento de hidrología computacional

225 El avance en las técnicas de procesamiento de hidrología computacional ha permitido estudios cada vez más
 226 sofisticados de fenómenos hídricos, impulsado por las actualizaciones y herramientas disponibles hoy en día,
 227 entre las cuales destacan las de GRASS GIS (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson
 228 et al., 1991; McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988).
 229 Por su potencial y múltiples complementos disponibles, todo el procesamiento de hidrología computacional lo
 230 desarrollamos en GRASS GIS (Figura 3).

231 Antes de iniciar el procesamiento de hidrología computacional con GRASS GIS, aplicamos una máscara de
 232 país, delimitada por la línea de costa y a los límites fronterizos, para evitar que las redes se extendieran más
 233 allá de nuestra área de interés. Posteriormente, generamos el mapa de acumulación de flujo con el complemento

234 `r.watershed` (GRASS Development Team, 2022d) (Figura S9), y utilizamos este mapa como fuente de los
 235 complementos de la familia `r.stream*` para el estudio de redes de drenaje y jerarquía hidrográfica (Jasiewicz
 236 y Metz, 2011). Dentro de esta familia se encuentran `r.stream.extract`, que usa el mapa de acumulación de
 237 flujo generado por `r.watershed` para extraer la red, `r.stream.order` para calcular la jerarquía hidrográfica,
 238 `r.stream.basins` para crear cuencas hidrográficas en función de la referida jerarquía, y `r.stream.stats`
 239 para calcular estadísticos y parámetros del análisis hortoniano. En consecuencia, aplicamos estos algoritmos
 240 al DEM para generar la hidrografía dominicana jerarquizada y la delimitación de las cuencas según órdenes,
 241 proceso que sumarizamos a continuación.

242 Empleando el DEM y el mapa de acumulación creado con `r.watershed`, generamos la red hidrográfica
 243 usando el complemento `r.stream.extract`, enfocándonos en la extracción de cursos indiferenciados, sin
 244 caracterización hidrodinámica, sólo morfológica (Freeman, 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al.,
 245 2021). Basándonos en experiencia de terreno y estudios previos, seleccionamos umbrales de acumulación de
 246 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas respectivamente (Freeman, 1991; Marchesini et al.,
 247 2021). Automatizamos la generación de las redes con un bucle `for` en Bash, iterando sobre cada umbral de
 248 acumulación; para cada red generada (Figura S10), actualizamos la base de datos y creamos un resumen con
 249 estadísticas básicas.

250 Para determinar la red hidrográfica óptima de alta densidad de República Dominicana, realizamos una
 251 inspección visual de los tres resultados generados a partir de los umbrales de acumulación elegidos (Figura S11).
 252 Tras evaluar las redes, seleccionamos la obtenida con el umbral de 540 celdas, por ajustarse a nuestros criterios
 253 de selección. Sin embargo, para preservar la reproducibilidad de nuestros resultados y facilitar eventuales
 254 aplicaciones futuras, decidimos conservar todas las redes en la base de datos, incluyendo las originadas a
 255 partir de los umbrales de 180 y 900 celdas. En concreto, la red generada con el umbral 180 celdas, presenta
 256 un buen ajuste con las vaguadas topográficas marcadas en el mapa topográfico, ofreciendo diversas opciones
 257 para futuros estudios o aplicaciones que requieran niveles de resolución más detallados (Figura S12).

258 A continuación, con el complemento `r.stream.order` de GRASS GIS, calculamos la jerarquía de la red
 259 hidrográfica para cada uno de los umbrales de acumulación previamente establecidos (180, 540 y 900 celdas),
 260 utilizando un bucle en Bash para automatizar el proceso. Este análisis permitió obtener la jerarquía de la
 261 red hidrográfica de acuerdo a los métodos de Strahler y Horton, ofreciendo información útil para nuestros
 262 objetivos (Horton, 1945; Strahler, 1957). El resultado obtenido lo usamos como entrada del complemento
 263 `r.stream.stats` para obtener los estadísticos básicos de la red hidrográfica según órdenes, como los promedios
 264 de longitudes y pendientes, la densidad de drenaje y la razón de bifurcación, entre otros.

265 Utilizando el complemento `r.stream.basins` de GRASS GIS, delimitamos las cuencas y subcuencas según
 266 la jerarquía de red para cada uno de los tres umbrales de acumulación. Este proceso permitió la delimitación
 267 de unidades que incluyen, de forma indiferenciada, tanto cuencas como subcuencas con redes de drenaje
 268 tributarias. Posteriormente, aplicamos el mismo complemento para delimitar las cuencas que desembocan en el
 269 mar, lagos, lagunas o pérdidas del karst, excluyendo las subcuencas tributarias (e.g. cuencas sin prolongación
 270 de drenaje superficial fuera de ellas).

271 Seleccionamos las cuencas generadas para el umbral de 540 celdas y las convertimos en un modelo de datos
 272 vectorial utilizando el complemento `r.to.vect` de GRASS GIS, eliminando las cuencas de menos de 4000 m².
 273 Este procedimiento incluyó la creación y actualización de una nueva columna `strahler` en la tabla de
 274 atributos de cada capa vectorial para indicar el correspondiente orden de red. Después de procesar y fusionar
 275 todas las cuencas de cada orden en una única capa vectorial con `v.patch`, procedimos a limpiar y preparar
 276 los datos para el análisis. Este paso, que incluyó la corrección de topología, la actualización del área de cada
 277 cuenca con `v.clean`, la eliminación de áreas espurias y artefactos, resultó crítico para garantizar la precisión
 278 de nuestros resultados. A continuación, seleccionamos los datos válidos y los exportamos a un archivo de
 279 texto, lo que nos proporcionó valiosas estadísticas del área para cada cuenca con desembocadura en mares,
 280 lagos o en pérdidas kársticas, según el orden Strahler para nuestro análisis posterior.

281 Finalizamos la etapa de procesamiento hidrológico utilizando los complementos `r.stream.stats` y
 282 `r.accumulate`. Mediante `r.stream.stats`, derivamos estadísticas fundamentales de redes y cuencas clasifica-
 283 das por órdenes de red. Estas incluyeron medidas como los promedios de longitud de los cursos, áreas drenadas,
 284 pendientes, gradientes y diferencias de elevación. Además, determinamos la razón de bifurcación utilizando
 285 dos métodos: coeficientes de regresión y promedios. Por su parte, con `r.accumulate` generamos los cursos
 286 más largos de aquellos ríos con un alto orden de red, asegurando, a su vez, una adecuada representatividad
 287 territorial.

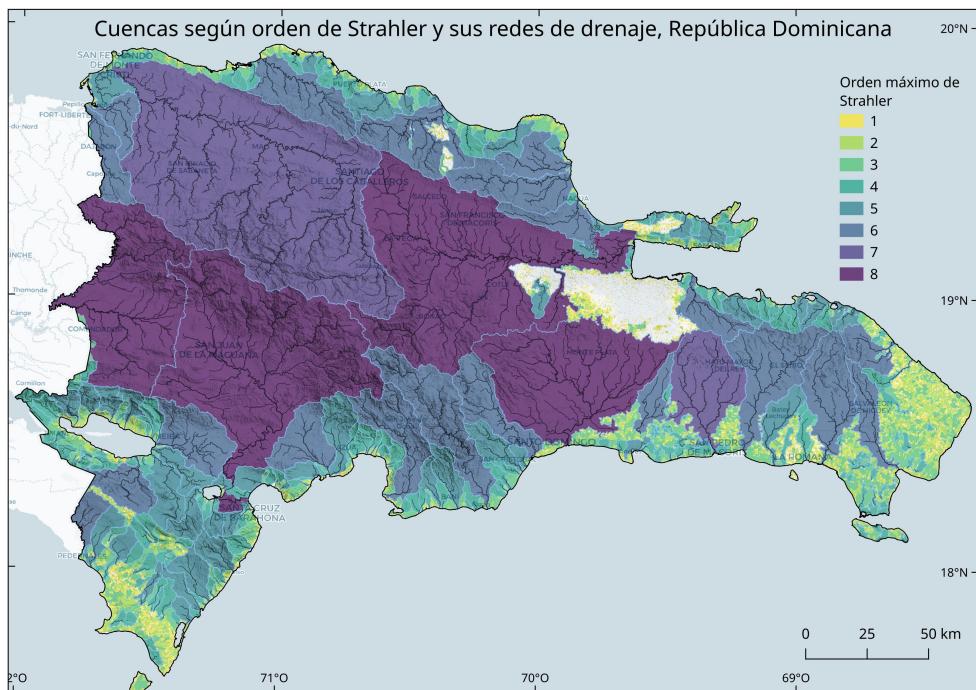


Figura 4: Cuenca que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas categorizadas según orden de Strahler de República Dominicana, y sus correspondientes redes de drenaje (sólo mostrando los cursos de orden 4 o superior). El umbral de acumulación usado para extraer la red fue de 540 celdas (aprox. 8 ha).

288 3. Resultados

289 La base de datos de cuencas hidrográficas delimitadas y la red de drenaje extraída usando el umbral de
290 acumulación de 540 celdas (~8 ha), se ajustó bien a nuestros criterios óptimos de selección. El modelo de red
291 hidrográfica y la delimitación de cuencas demostró coherencia, suficiente detalle y una diversidad sustancial a
292 lo largo del territorio dominicano, especialmente en las áreas de montaña, proporcionando una representación
293 hidrográfica precisa sin atenuar patrones de variabilidad. Presentamos a continuación los principales hallazgos,
294 en forma de resúmenes estadísticos, de las cuencas y sus redes de drenaje.

295 3.1. Cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas

296 En el caso de las cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, en total delimitamos
297 7087 cuencas hidrográficas (Figura 4). Predominan cuencas de gran tamaño y anchura en los valles del Cibao
298 y de San Juan, así como en la periferia de la plataforma kárstica sudoriental. Por otro lado, las cuencas
299 medianas y de forma alargada con forma ligeramente ensanchada en cabecera, tienden a concentrarse a lo
300 largo del borde meridional de la Cordillera Central y en el karst de la plataforma sudoriental. Las cuencas
301 más pequeñas, en cambio, se distribuyen de manera más uniforme a través de los sistemas kársticos y zonas
302 costeras. Entre todas las cuencas delimitadas, se alcanzó una jerarquía de red máxima de ocho, condición que
303 sólo se observó en tres cuencas específicas: Yaque del Sur, Yuna y Ozama.

304 La cuenca más extensa, correspondiente al río Yaque del Norte, cubre una superficie de 6986 km^2 , aunque
305 sólo alcanzó orden máximo de siete, seguida de las cuencas de los ríos Yuna (4950 km^2) y Yaque del Sur
306 (4674 km^2), ambas con orden máximo de ocho (en la sección “Discusión” abordamos la discrepancia entre las
307 superficies de cuencas obtenidas por nosotros y los tamaños publicados en referencias existentes). El tamaño
308 promedio de las cuencas es de 7 km^2 y desviación estándar de 129 km^2 , reflejando la diversidad de las cuencas
309 hidrográficas presentes en el país.

310 La mitad de las cuencas delimitadas tiene 0.36 km^2 o menos de superficie, el 25 % de las cuencas más grandes
311 apenas supera los 0.85 km^2 y, de hecho, el 5 % más grande sólo alcanza 5.4 km^2 o más. Por lo tanto, la
312 distribución de las cuencas por tamaño es asimétrica hacia la derecha (asimetría calculada, 40.2), con un



Figura 5: Número de cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~8 hectáreas)

313 importante número de cuencas pequeñas y pocas grandes, un patrón bastante común en este tipo de conjunto
 314 de datos.

Tabla 1: Orden de red de Strahler y número de cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Orden de red (Strahler)	Número de cuencas	Área total (km ²)	Área promedio (km ²) (error est.)
1	4152	1095	0.2638 (0.002423)
2	2077	1979	0.9526 (0.01493)
3	624	2406	3.856 (0.1192)
4	164	3541	21.59 (1.239)
5	44	4559	103.6 (10.94)
6	20	10130	506.7 (55.31)
7	2	7960	3980 (3006)
8	4	14970	3743 (620)
Total	7087	46640	-

315 Los estadísticos básicos de cuenca sugieren que los resultados obtenidos fueron consistentes, pues observamos
 316 el típico decrecimiento exponencial del número de cuencas en relación con el orden de red (ver Figura 5 y
 317 Tabla 1). En segundo lugar, destaca un hecho particular reseñable: el número de cuencas de orden siete es
 318 menor que el número de cuencas de orden ocho, un hecho que afecta a la cuenca del Yaque del Norte que,
 319 con independencia de su gran tamaño, no alcanza la jerarquía máxima.

320 Una caracterización de las cuencas que alcanzan un orden cuatro o mayor resulta también oportuna en este
 321 caso, dado que las de orden de red inferior son muy numerosas y, por la naturaleza del DEM empleado, la
 322 delimitación de las cuencas pequeñas es más propensa a error. Así, enfocando nuestro análisis sólo en las
 323 cuencas de orden cuatro o mayor, encontramos algunos patrones de interés que merecen mención.

324 Contabilizamos 234 cuencas de orden cuatro y mayor, lo que representa un 3.3 % del total nacional. Sin
 325 embargo, este pequeño porcentaje representa, en términos de superficie, el 88.3 % del área total de cuencas. En
 326 este subconjunto encontramos un tamaño mínimo de 2.37 km², promedio de 176 km² y desviación estándar
 327 de 129 km². La mitad de las cuencas de orden cuatro y mayor 25.08 km² o menos de superficie y, aunque este
 328 subconjunto de cuencas tiene mejor distribución, la asimetría a la derecha persiste (asimetría: 7.3).

329 **3.2. Cuencas y subcuencas**

330 Extrajimos las cuencas y subcuencas en función de su orden de red y calculamos su extensión superficial. En
 331 este caso, delimitamos las unidades hidrográficas de forma desagregada para aportar insumos al análisis de
 332 posibles patrones de asociación con elementos territoriales y ambientales (Tabla 2 y Figura 6).

Tabla 2: Estadísticos de superficie (en km^2) de cuencas y subcuencas según orden de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

Orden de red	Número	Media (km^2)	Mediana (km^2)	Desv. están-dar (km^2)	Mínimo (km^2)	Máximo (km^2)	Rango (km^2)	Sesgo	Curtosis
1	99918	0.29	0.23	0.21	0.00	3.33	3.33	2.35	9.80
2	22788	1.27	1.01	0.93	0.06	11.13	11.07	2.19	8.03
3	4942	5.73	4.47	4.29	0.58	36.26	35.68	2.10	6.54
4	1049	26.79	21.78	18.73	2.37	132.07	129.69	1.70	3.90
5	222	126.19	105.11	86.52	12.37	514.25	501.88	1.58	3.27
6	51	489.56	402.30	241.66	68.91	1031.78	962.88	0.42	-0.85
7	10	2042.74	1571.14	1815.15	664.63	6985.68	6321.06	2.69	7.78
8	4	3742.74	3678.55	1240.04	2663.91	4949.95	2286.04	0.04	-5.75

333 Debido a la relación exponencial entre el área y el orden de red, existe una diferencia significativa en el
 334 tamaño de las cuencas dependiendo de su orden. Las cuencas de orden 1 son considerablemente más pequeñas,
 335 con un tamaño promedio de menos de 4 km^2 . En contraste, las cuencas de orden 8 son varios órdenes de
 336 magnitud más grandes, abarcando casi 5000 km^2 en promedio. En lo que respecta a su abundancia, el patrón
 337 se invierte. Las cuencas de orden 1 son las más frecuentes, contabilizando cerca de 100,000 en total. Por otro
 338 lado, las cuencas de orden 8 son las menos comunes, con solamente cuatro identificadas en todo el territorio
 339 dominicano. Las cuencas, en todos los órdenes, presentaron una distribución asimétrica de su superficie
 340 calculada, salvo en el caso de las de orden seis, donde se alcanzó buena simetría.

341 A lo largo de todos los órdenes de red, observamos la presencia de valores atípicos en las superficies calculadas
 342 (Figura 6). En algunos contextos, estos atípicos fueron resultado de errores de cómputo o de delimitación
 343 de cuencas y subcuencas, en cuyo caso, corregimos la base de datos eliminando dichas observaciones. No
 344 obstante, hubo casos en los que ciertas cuencas y subcuencas presentaban dimensiones atípicas genuinas.
 345 Un ejemplo notable es una subcuenca de orden seis, afluente del río Yuna, que se extiende desde el borde
 346 occidental de la península de Samaná. Por otro lado, respecto a la asimetría, detectamos distribuciones con
 347 sesgo hacia la derecha en todos los órdenes (Tabla 2). Sin embargo, el conjunto correspondiente al orden seis
 348 destacó al mostrar una distribución altamente simétrica.

349 Representamos la distribución espacial de subcuencas según órdenes y tamaño en el mapa de la Figura 7.
 350 Cada uno de los órdenes obtenidos, del uno al ocho, se encuentra representado en casi todo el territorio
 351 dominicano, especialmente en sus cadenas montañosas. La mayor parte de las unidades delimitadas son
 352 subcuencas, especialmente las de orden jerárquico inferior, cuyas redes de drenaje son tributarias de otras
 353 subcuencas y cuencas de órdenes mayores. Analizamos la distribución de las cuencas y subcuencas delimitadas
 354 según órdenes a continuación.

355 Las subcuencas de los órdenes uno, dos y tres forman cúmulos particularmente llamativos en los sistemas
 356 montañosos, y su distribución a menudo refleja la orientación general de las estructuras geológicas. En
 357 particular, las subcuencas que son relativamente grandes en su categoría jerárquica, se reparten de forma
 358 dispersa en la cordillera Central, pero muestran un patrón concentrado en elevaciones altas e intermedias
 359 de las montañas kársticas, incluyendo las sierras de Bahoruco y Neyba, en los afloramientos de calizas de
 360 la cordillera Oriental, así como en determinados sectores de la cordillera Septentrional. En esta última, las
 361 subcuencas grandes de los órdenes uno, dos y tres, se concentran en dos áreas clave: a lo largo del eje principal
 362 de la cordillera y en las laderas que rodean la Loma Isabel de Torres. La concentración de subcuencas grandes
 363 de órdenes pequeños en dichas áreas, pone de relieve la complejidad geológica e hidrológica de esos terrenos
 364 montañosos.

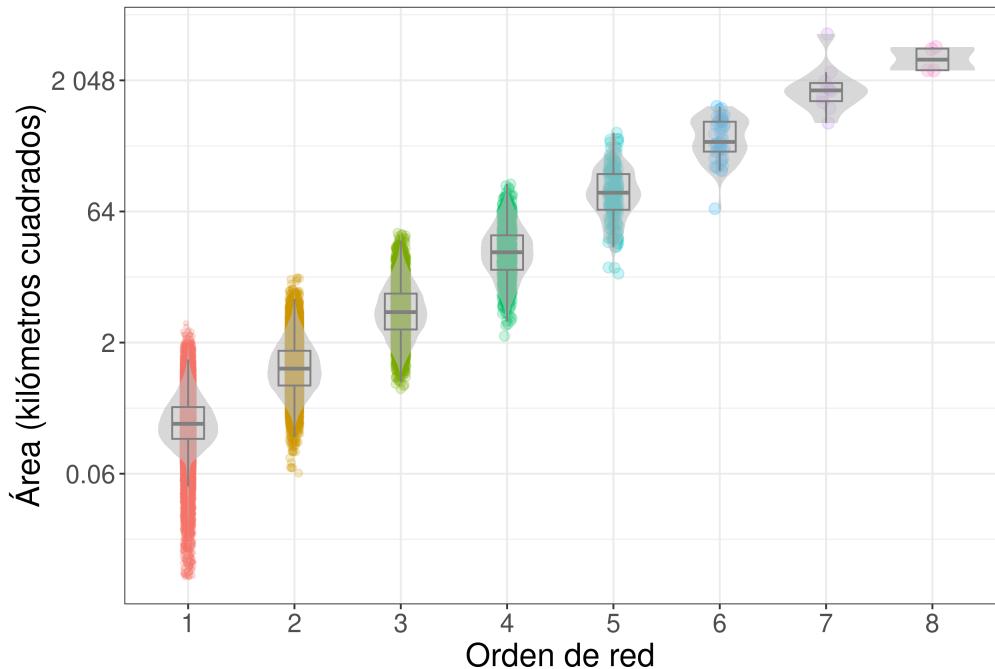


Figura 6: Área de las cuencas y subcuenas según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~8 hectáreas)

365 Las subcuenas de orden cuatro, abarcando tamaños desde pequeñas hasta medianas y grandes, se encuentran
 366 ampliamente distribuidas en toda la República Dominicana. Este grupo presenta características singulares
 367 que detallaremos a continuación. Las grandes destacan generalmente por ser alargadas y por encontrarse
 368 comúnmente orientadas según las estructuras geológicas, mientras que las medianas y pequeñas tienen mayor
 369 razón de circularidad, y suelen repartirse de forma dispersa, rodeando cúmulos de cuencas grandes. De manera
 370 particular, las subcuenas de orden cuatro son especialmente abundantes y grandes en todas las vertientes de
 371 la cordillera Central (más escasas al norte), así como en las vertientes meridionales de la cordillera Oriental y
 372 de las sierras de Yamasá y Bahoruco. Igualmente, destacan cúmulos de cuencas de orden cuatro de tamaño
 373 grande en determinados sectores de la cordillera Septentrional.

374 En la cordillera Central, las subcuenas grandes de orden cuatro se concentran en torno a su eje principal
 375 noroeste-sudeste, especialmente en los alrededores de sus máximas elevaciones (Alto Bandera, picos Duarte y
 376 La Pelona), en las vertientes de enlace con los valles altos y medios (e.g. Valle de Bao, Valle Nuevo, Constanza,
 377 Jarabacoa), dentro del denominado “Cinturón de Peralta”—según Hernaiz Huerta y Andrés (2002), se trata
 378 de un sistema de cabalgamientos imbricado con pliegues, de vergencia hacia el sur, dentro de la denominada
 379 cuenca sedimentaria de Azua—, y en el borde sudoriental, concretamente en niveles medios y altos de las
 380 cuencas de los ríos Nizao, Haina, Nigua.

381 En la sierra de Yamasá y en la cordillera Oriental, las subcuenas de orden cuatro, particularmente las grandes,
 382 forman cúmulos densos integrados dentro de cuencas de orden superior, como las del Ozama, Maguá, Chavón,
 383 Cumayasa y Duey. En la sierra de Bahoruco, las subcuenas de orden cuatro son particularmente grandes en la
 384 vertiente sur, en concreto en el subsistema denominado “Bahoruco Occidental”—según Martínez-Batlle (2012),
 385 se trata de un sistema montañoso de morfologías de superficies corrosivas Fini-Paleógenas y Fini-Pliocenas
 386 labradas sobre calizas Cenozoicas, escalonadas desde 2200 m hasta los 100 m—y hacia el enlace con el Hoyo
 387 de Pelempito—uno de los más conocidos *poljes* dominicanos. En este caso, se trata de cuencas sin cursos
 388 fluviales permanentes, en las que la infiltración logra abrirse paso a través del karst. Finalmente, las cuencas
 389 de orden cuatro en la cordillera septentrional, se localizan especialmente en los niveles intermedios y altos de
 390 la cuenca del río Bajabonico, así como hacia al norte de las ciudades de Santiago, Salcedo y San Francisco de
 391 Macorís. Destaca particularmente la alargada subcuenca de orden cuatro del río Nagua, con casi 130 km², la
 392 cual sigue el rumbo predominante—noroeste-sudeste—de la Falla Septentrional.

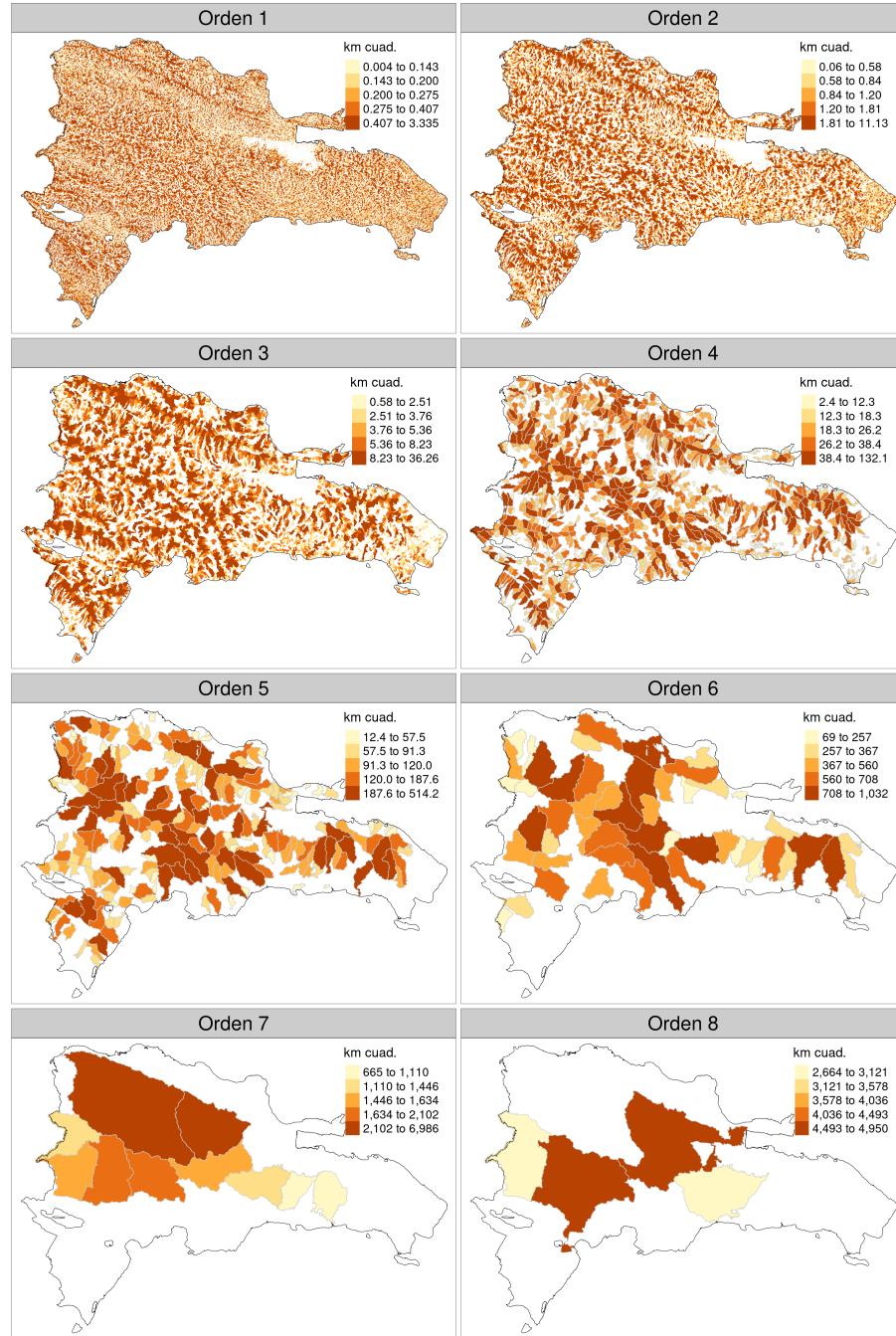


Figura 7: Distribución espacial de las cuencas y subcuenca según superficie calculada y órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~ 8 hectáreas)

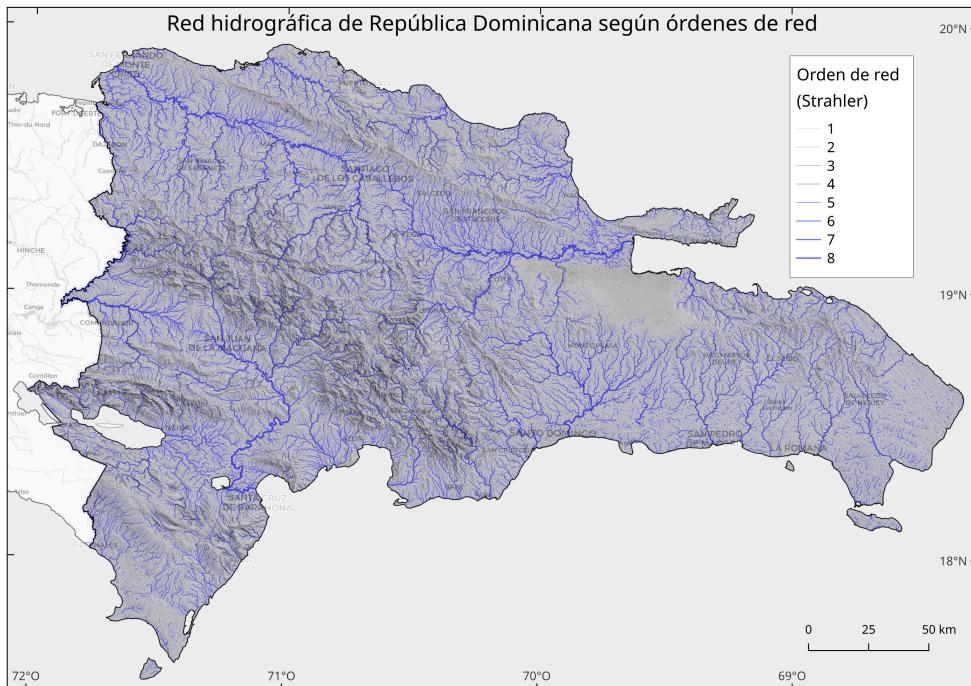


Figura 8: Representación de la red hidrográfica dominicana simbolizando el grosor de los segmentos en función de su orden de red (método de Strahler). El orden máximo alcanzado fue de 8. Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 540 celdas (~8 ha)

393 Las cuencas y subcuencas pertenecientes a los órdenes cinco y seis exhiben patrones de distribución espacial
 394 notablemente parecidos entre sí. Varias unidades de estos órdenes son cuencas propiamente, cuyo curso
 395 principal desemboca comúnmente en el Mar Caribe, el Océano Atlántico o el Lago Enriquillo. Algunos
 396 ejemplos de cuencas de orden seis son las de los ríos Nizao, Haina, Ocoa, Soco, Chavón), y algunas de orden
 397 cinco son las de los ríos Nigua, Cumayasa, Nizaito, Jura, Duey. Asimismo, por su tamaño, destacan algunas
 398 subcuencas en la vertiente norte y oriental de la cordillera Central, las cuales encierran redes tributarias de
 399 los ríos Yaque del Norte y Yuna. Es importante subrayar que las cuencas medianas y grandes de estos órdenes
 400 muestran consistentemente una forma alargada, siguiendo en la mayoría de los casos la orientación de las
 401 estructuras geológicas predominantes.

402 Por último, caracterizamos las unidades hidrográficas delimitadas como de órdenes siete y ocho. Estas
 403 muestran una concentración espacial significativa, junto con una amplia variación en términos de tamaño. En
 404 el orden siete delimitamos diez unidades, de las cuales sólo las correspondientes a los ríos Yaque del Norte
 405 e Higuamo califican propiamente como cuencas, ya que son las únicas que tienen desembocaduras directas
 406 al mar. La cuenca del río Yaque del Norte es particularmente importante en República Dominicana, pues
 407 es la más grande en términos de superficie, y porque cuenta con múltiples infraestructuras orientadas a la
 408 producción de agua potable y de riego, así como a la generación hidroeléctrica. No obstante, es notable el
 409 hecho de que esta cuenca, siendo la más grande del país, sólo haya alcanzado el orden siete. También es
 410 destacable el hecho de que la cuenca del río Higuamo haya alcanzado este orden.

411 Finalmente, caracterizamos las unidades hidrográficas identificadas como de órdenes siete y ocho, cuyas
 412 particularidades incluyen una notable concentración espacial y una diversidad considerable en sus dimensiones.
 413 Dentro del orden siete, distinguimos diez unidades, pero sólo las correspondientes a los ríos Yaque del Norte e
 414 Higuamo cumplen con las características completas de cuencas, dada su condición de contener desembocaduras
 415 directas al mar. Especial mención merece la cuenca del río Yaque del Norte, por su relevancia en la República
 416 Dominicana. Esta se destaca por ser la de mayor superficie en el país, y por albergar múltiples infraestructuras
 417 esenciales para la producción de agua potable, riego y generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, es
 418 interesante observar que, a pesar de ser la cuenca más extensa del país, su jerarquía sólo alcanza el orden
 419 siete, quedando por detrás de otras cuencas que sí alcanzan el orden ocho. Resulta igualmente notable que la

420 cuenca del río Higuamo, con un tamaño mucho menor (un orden de magnitud más pequeña), haya alcanzado
 421 este mismo orden.

422 En cuanto a las cuencas de orden ocho, delimitamos sólo cuatro. En este grupo se incluyen las cuencas del río
 423 Yaque del Sur y del Yuna, que son las número segunda y tercera en tamaño para todo el país, respectivamente.
 424 Las otras dos cuencas son las del río Artibonito—curso fluvial fronterizo que, al confluir con el Macás,
 425 adquiere el orden ocho—y la del Ozama. La red fluvial del Artibonito podría alcanzar un orden máximo
 426 superior a ocho si se analizara su cuenca completa, como bien comentamos en la sección de Metodología.
 427 Destacamos a la cuenca del río Ozama como una singularidad entre las cuencas listadas dentro de este orden
 428 jerárquico, pues se trata de una cuenca relativamente pequeña, pero con una red bastante ramificada. Con
 429 sus 270 km² calculados en este estudio, es la cuenca más pequeña de mayor orden de todo el país.

430 3.3. Red de drenaje

431 La red de drenaje de República Dominicana exhibe una variabilidad notable en sus órdenes jerárquicos, lo que
 432 se manifiesta en la heterogeneidad de su distribución espacial y topográfica. Esta complejidad en la jerarquía
 433 hidrográfica puede apreciarse en la Figura 8, en la cual se observan distintas densidades de drenaje según
 434 territorios, con mayores concentraciones de *talweds* en la vertiente meridional de la cordillera Central y en la
 435 cordillera Septentrional. En los grandes valles, la dirección predominante de los grandes cursos fluviales es
 436 noroeste-sudeste y la red complementaria es ortogonal. En la cordillera Oriental y en el enlace hacia el karst
 437 de plataforma del sudeste, la dirección predominante es norte-sur. Destaca igualmente la ausencia de drenaje
 438 superficial en los sistemas kársticos de Los Haitises, y en sectores de la sierra de Bahoruco y la cordillera
 439 Septentrional.

440 Extrajimos más de 129000 *talweds*, los cuales alcanzaron una longitud de poco más de 98000 km (Tabla 3).
 441 El análisis hortoniano y la caracterización hidrográfica por órdenes de red según el método de Strahler,
 442 proporcionaron información valiosa sobre la estructura y organización de los sistemas fluviales dominicanos.
 443 El orden jerárquico más alto alcanzado fue ocho, visible en tramos bien extendidos de los ríos Yuna y Yaque
 444 del Sur. Asimismo, un tramo bajo del río Ozama justo aguas abajo de su confluencia con el Yabacao, alcanzó
 445 el orden este orden máximo, así como en un pequeño segmento del sistema Macás-Artibonito situado justo
 446 en la confluencia de ambos ríos. El río dominicano más largo, el Yaque del Norte, sólo alcanzó el orden
 447 jerárquico siete, justo aguas abajo de los ríos Bao, Jagua y Guanajuma, los cuales confluyen en el embalse de
 448 Bao. Otro río que alcanzó el orden siete, aunque con un tamaño mucho menor que el Yaque del Norte, fue el
 449 Higuamo, justo aguas abajo de la confluencia con uno de sus más importantes tributarios, el río Maguá.

Tabla 3: Totales de número de cursos y longitudes de cursos según órdenes de Strahler de la red generada

Orden de red	Número de cursos	Longitud total (km)
1	100126	49627.78
2	22790	24469.96
3	4942	12267.06
4	1049	6381.46
5	222	3329.86
6	51	1362.22
7	10	599.50
8	4	257.31
Total	129194	98295.14

450 Los cursos de órdenes pequeños—e.g., del uno al cuatro—suman un total de 128907 cursos, casi la totalidad
 451 de todos los cursos (en número), mientras que en longitud suponen 92746 km (94 %). Estos cursos de órdenes
 452 pequeños, especialmente los de los órdenes uno y dos, se concentran en áreas de montaña, especialmente en
 453 sectores de cabecera, cuencas vertiente y áreas de captación, siendo escasos en las grandes llanuras y valles
 454 bajos. Son especialmente densos en redes de drenaje del sudeste, especialmente en el área del denominado
 455 “Cinturón de Peralta”, así como en las vertientes altas de la cordillera Septentrional.

456 Numerosos ríos dominicanos alcanzaron órdenes de cinco y seis, concentrados especialmente los valles
 457 intramontanos y en los piedemontes de los sistemas montañosos dominicanos, justo en el enlace con los
 458 grandes valles bajos. Destacan especialmente los tramos de ríos situados en los piedemontes septentrional

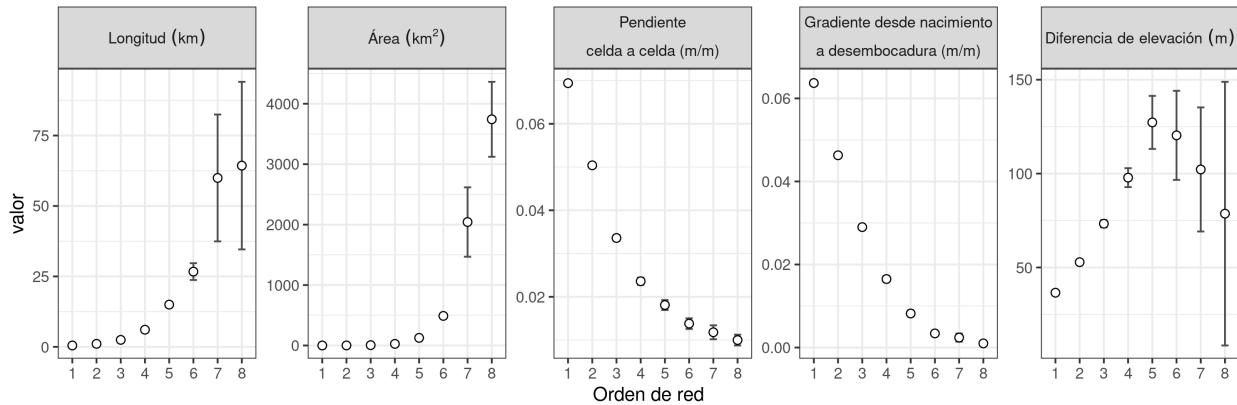


Figura 9: Promedios de longitud de cursos, área de cuenca, pendiente (celda a celda), gradiente (entre extremos) y rango promedio (diferencia de elevación), por tramos, según órdenes de Strahler

Tabla 4: Promedios y errores estándar (entre paréntesis) de longitud, área de cuenca, pendiente (celda a celda), gradiente (entre extremos) y rango promedio (diferencia de elevación), por tramos, según órdenes de Strahler.

Orden de red	Longitud (km)	Área (km ²)	Pendiente (m/m)	Gradiente (m/m)	Diferencia de elevación (m)
1	0.5 (0.001)	0.29 (7e-04)	0.069 (3e-04)	0.064 (3e-04)	37 (0.2)
2	1.1 (0.007)	1.3 (0.006)	0.05 (5e-04)	0.046 (5e-04)	53 (0.7)
3	2.5 (0.03)	5.7 (0.06)	0.034 (7e-04)	0.029 (6e-04)	73 (2)
4	6.1 (0.2)	27 (0.6)	0.024 (8e-04)	0.016 (7e-04)	98 (5)
5	15 (0.9)	130 (6)	0.018 (0.001)	0.0082 (8e-04)	130 (10)
6	27 (3)	490 (30)	0.014 (0.001)	0.0034 (5e-04)	120 (20)
7	60 (20)	2000 (600)	0.012 (0.002)	0.0024 (0.001)	100 (30)
8	64 (30)	3700 (600)	0.01 (0.001)	0.001 (5e-04)	79 (70)

459 y meridional de la cordillera Central, justo en los enlaces con los valles del Cibao (afluentes del Yaque del
 460 Norte) y de San Juan (tributarios del Yaque del Sur). También son comunes los cursos de órdenes cinco y
 461 seis en el borde meridional de la cordillera Central, específicamente en el sector que enlaza con el Mar Caribe,
 462 entre los que destacan los ríos Nizao, Ocoa, Haina, Nigua, Jura y Tábara. Asimismo, varios ríos que nacen en
 463 la cordillera Oriental, y que desembocan en el Mar Caribe, pertenecen a los órdenes cinco y seis, entre los
 464 que merecen mención los ríos Yuma, Chavón, Cumayasa y Soco. También en este sector se encuentra el río
 465 Brujuelas, de orden máximo seis, el cual se pierde, a través de un conjunto de *ponors*, dentro del karst de
 466 plataforma del sudeste dominicano. Por otra parte, varios sistemas fluviales de la cordillera Septentrional
 467 alcanzaron el orden seis, como son el Boba, Bacúi, Yásica y Bajabonico. Finalmente, algunos ríos o cursos
 468 temporales que desembocan en el Lago Enriquillo son de orden seis, como el Panzo y Las Damas.

469 También analizamos la morfometría de la red hidrográfica en función del orden de red (Tabla 4). Específicamente,
 470 evaluamos los promedios de las siguientes cinco variables por tramos de cursos fluviales: longitud
 471 (km), área de cuenca (km²), pendiente (celda a celda, m/m), gradiente (desde nacimiento a desembocadura,
 472 m/m) y diferencia de elevación (m). Los valores de cada variable incluyen una estimación del error estándar
 473 como medida de dispersión (ver Figura 9 y Tabla 4).

474 El patrón observado en los promedios de longitud y área drenada sigue una relación exponencial directa con el
 475 orden de la red (Figura 9). Además, la variabilidad de estas métricas se intensifica en los órdenes de red más
 476 altos, siendo especialmente notable en los órdenes siete y ocho. Para los órdenes de red del uno al cuatro, las
 477 longitudes promedio fluctúan entre 0.5 y 6.1 km, mientras que las áreas promedio oscilan entre 0.29 y 27 km²,
 478 promedios muy bajos en comparación con los correspondientes a los órdenes de red más altos. Notamos que se
 479 produce una inflexión notable en los promedios de los órdenes cinco y seis, antes de alcanzarse las longitudes
 480 y superficies promedio máximas en los órdenes siete y ocho. En particular, las longitudes rondan los 60 km,
 481 mientras que las áreas se sitúan entre 2043 y 3743 km² para estos órdenes de red.

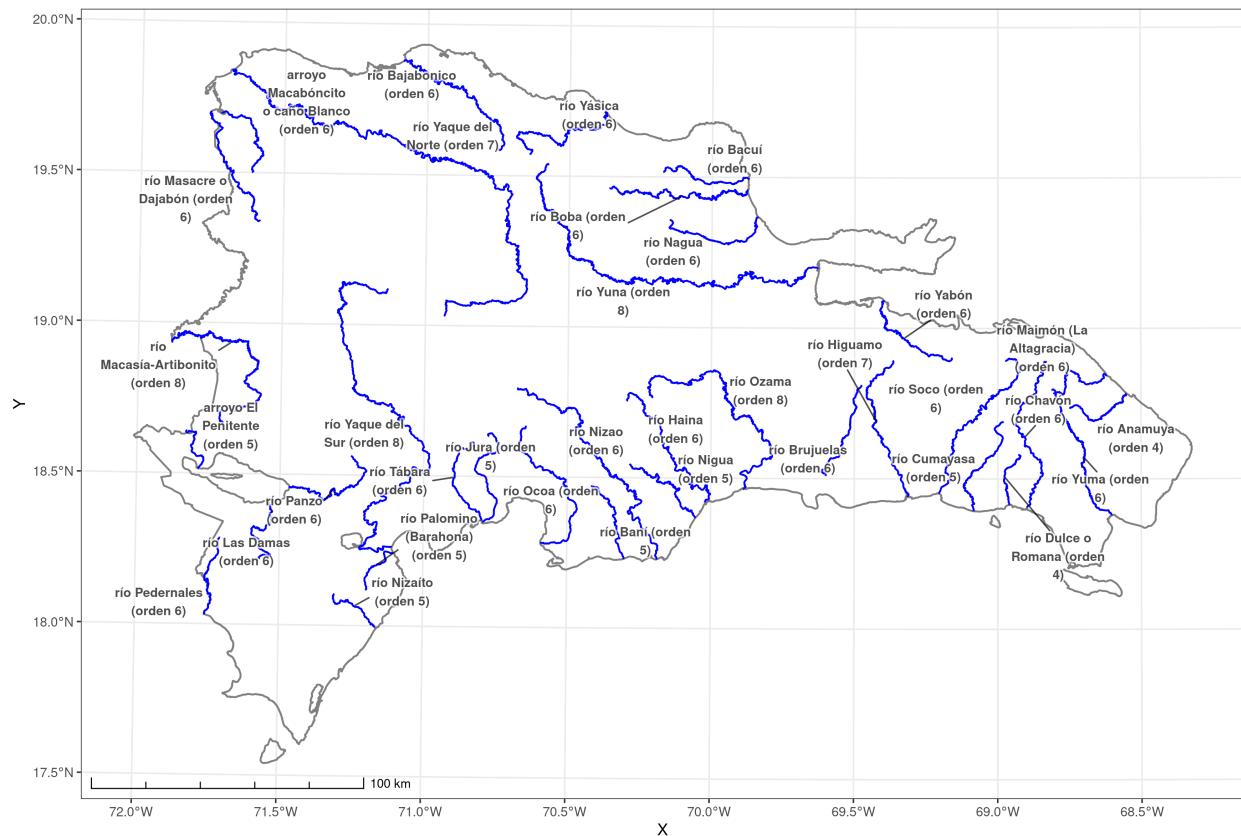


Figura 10: Cursos más largos de 35 ríos seleccionados de la República Dominicana basados en orden de red y representatividad territorial. Se priorizaron ríos de orden seis o superior. En áreas del sur y sudoeste, se incluyeron ríos de orden cinco de notable longitud.

- 482 Por otro lado, tanto la pendiente promedio (celda a celda) como el gradiente promedio (cabecera a desem-
 483 bocadura) muestran una disminución a medida que aumenta el orden de red, siguiendo una típica relación
 484 inversa exponencial (Figura 9). Aunque se trata de valores generalmente pequeños, pues se trata de métricas
 485 tomadas por tramos o celda a celda, el rango de variación es sustancial. La pendiente promedio para el primer
 486 orden es de 0.069 m/m , disminuyendo hasta 0.01 m/m en el octavo orden. En forma similar, el gradiente
 487 promedio disminuye desde 0.064 m/m en el primer orden a 0.001 m/m en el octavo orden.
- 488 El último promedio analizado fue la diferencia de elevación. Esta variable presenta un patrón distinto al de
 489 las anteriores, pues incrementa su valor promedio desde el orden uno al cinco y, a partir de este orden, se
 490 produce una inflexión y descende hasta alcanzar el orden ocho, aumentando al mismo tiempo su dispersión.
 491 En el orden uno, el promedio de la diferencia de elevación fue de 37 m, alcanza un promedio más alto de
 492 127 m en el quinto orden de red, manteniéndose igualmente alto en el seis (120 m). A partir de este orden, se
 493 produce un descenso de los promedios, conjuntamente con un aumento de la dispersión, hasta alcanzarse el
 494 valor de 79 m en el orden ocho.
- 495 También analizamos en detalle los cursos más largos de 35 ríos redes de drenaje seleccionadas de República
 496 Dominicana. La selección de este subconjunto la apoyamos en dos criterios: orden de red y representatividad
 497 territorial. De manera preferente, incluimos cursos fluviales de orden seis o superior. En áreas del sur y
 498 sudoeste del país donde este orden no fue alcanzado, elegimos algunos ríos de orden cinco de gran longitud.
 499 Este enfoque nos permitió obtener información valiosa sobre los rasgos básicos de longitud y orden de red de
 500 los ríos más largos y emblemáticos del país. Asimismo, al garantizar la representatividad territorial, logramos
 501 abarcar cada una de las regiones del país.
- 502 La Figura 10 muestra el trazado de los cursos más largos de ríos seleccionados. Los más grandes y de mayor
 503 jerarquía, de orden seis a ocho, se dividen en dos subgrupos distintos. El primer subgrupo incluye cursos que
 504 siguen direcciones predominantes, como los ubicados en el borde sudoriental de la cordillera Central (Haina,

505 Nizao, Nigua), aquellos que discurren por la vertiente meridional de la cordillera Oriental (Higuamo, Soco,
 506 Chavón), y los localizados al este de la cordillera Septentrional (Boba, Bacuí). El segundo subgrupo está
 507 compuesto por cursos con trazados tortuosos, destacando especialmente los ríos Ozama y Macasía-Artibonito,
 508 que alcanzaron un orden de red elevado y presentan longitudes notables.

Tabla 5: Longitud del curso más largo, y orden máximo, de 35 ríos seleccionados de República Dominicana, ordenados de mayor a menor longitud

Rango	Nombre	Longitud (km)	Orden máximo
1	río Yaque del Norte	334.30	7
2	río Yuna	272.00	8
3	río Yaque del Sur	251.50	8
4	río Nizao	150.60	6
5	río Ozama	148.70	8
6	río Macasía-Artibonito	128.10	8
7	río Boba	103.80	6
8	río Soco	94.38	6
9	río Bajabonico	92.16	6
10	río Yásica	88.50	6
11	río Haina	87.74	6
12	río Chavón	86.63	6
13	río Higuamo	83.98	7
14	río Ocoa	83.35	6
15	río Yuma	81.45	6
16	río Masacre o Dajabón	71.49	6
17	río Panzo	66.02	6
18	río Yabón	61.79	6
19	río Nagua	56.35	6
20	río Cumayasa	55.55	5
21	río Nigua	55.11	5
22	río Jura	54.06	5
23	río Bacú	51.50	6
24	río Brujuelas	50.99	6
25	arroyo Macabóncto o caño Blanco	48.78	6
26	río Las Damas	48.41	6
27	río Tábara	46.21	6
28	río Pedernales	44.08	6
29	río Baní	43.26	5
30	río Maimón (La Altagracia)	42.15	6
31	río Anamuya	41.45	4
32	río Nizaító	29.57	5
33	río Dulce o Romana	27.66	4
34	arroyo El Penitente	26.77	5
35	río Palomino (Barahona)	25.56	5

509 La Tabla 5 presenta los ríos seleccionados en función de la longitud de su curso, ordenados de mayor a menor.
 510 El río Yaque del Norte destaca con una longitud de 334 km y un orden máximo de siete. Este río nace en
 511 el pico del Yaque en la cordillera Central y desemboca en la bahía de Montecristi. Siguiendo en longitud,
 512 tenemos al río Yuna con 272 km y un orden máximo de ocho, con curso más largo extendiéndose por la
 513 cordillera Septentrional a través del río Licey, tributario del río Camú. Notablemente, los ríos Yaque del Sur,
 514 Macasía-Artibonito y Ozama tienen cursos más largos de 252, 128 y 149 km, respectivamente. Todos, incluido
 515 el Yuna, han alcanzado un orden máximo de ocho, subrayando su relevancia en la red de drenaje a nivel
 516 nacional. El Macasía-Artibonito es singular por lograr el orden máximo siendo el sexto en longitud, mientras
 517 que el Nizao, siendo el cuarto más largo con 151 km, alcanza solo el orden seis.

- 518 El resto de ríos en la tabla poseen cursos más largos de 100 km o menos, y un orden de seis o inferior. Se
 519 dividen en dos categorías: entre 40 y 100 km, y aquellos de 40 km o menos. El primer grupo, de 40 a 100 km,
 520 incluye 20 ríos, principalmente de orden seis, situados en las cordilleras Oriental y Central que desembocan
 521 en el mar Caribe, así como en la cordillera Septentrional que fluyen hacia el océano Atlántico. Estos sistemas
 522 fluviales a menudo tienen cuencas extensas, y muchos se originan o atraviesan regiones kársticas. Un caso
 523 destacado es el río Higuamo, que, a pesar de ser el 13° en longitud, tiene un orden de siete. El segundo grupo,
 524 de menos de 40 km, comprende principalmente ríos de los órdenes cinco y cuatro, ubicados en el sudoeste del
 525 país y en zonas kársticas orientales.
- 526 Finalmente, determinamos la razón de bifurcación y la densidad de la red de drenaje, tanto a nivel global
 527 como diferenciado por órdenes de red (ver Tabla 6). A escala global, la densidad de drenaje se estableció
 528 en 2.11 km/km². Por otro lado, al calcular la razón de bifurcación, obtuvimos dos métricas distintas: 4.34
 529 utilizando promedios, y 4.42 por medio de coeficientes de regresión. Descomponiendo estos indicadores por
 530 órdenes de red, se identifica un comportamiento distintivo en la densidad de drenaje: presenta un pico en
 531 los órdenes iniciales, con 1.7 km/km² en el primer orden, y exhibe un descenso progresivo hasta alcanzar
 532 0.0172 km/km² en el octavo orden. De manera similar, la razón de bifurcación refleja la esperada disminución
 533 a medida que avanzamos en el orden, comenzando con 4.39 en el primer orden y finalizando en 2.5 para el
 534 séptimo orden.

Tabla 6: Razones o cocientes de la red de drenaje

Orden de red	Razón de bifurcación	Densidad de drenaje (km/km ²)
1	4.39	1.70
2	4.61	0.84
3	4.71	0.43
4	4.73	0.23
5	4.35	0.12
6	5.10	0.05
7	2.50	0.03
8	0.00	0.02

535 4. Discusión

536 Elaboramos una representación detallada de cuencas hidrográficas y redes de drenaje de República Dominicana,
 537 a partir del DEM proporcionado con los productos ALOS PALSAR RTC. Con la aplicación de técnicas
 538 avanzadas de hidrología computacional y análisis hortoniano (GRASS Development Team, 2023; Horton, 1945;
 539 Jasiewicz y Metz, 2011; Strahler, 1957), no sólo logramos mejorar la delimitación de cuencas y la extracción
 540 de redes, sino que también caracterizamos los patrones fundamentales de la hidrografía dominicana mediante
 541 estadísticos propios de la hidrología computacional. Este avance es particularmente significativo en las áreas
 542 montañosas, donde las fuentes hasta la fecha disponibles, mostraban una red fragmentada o incompleta
 543 (INDRHI, 2012; Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989; OpenStreetMap contributors, 2017; Secretaría
 544 de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004). Simultáneamente, refinamos el DEM utilizado,
 545 priorizando el tallado de la red en zonas llanas, minimizando el ruido y preservando los elementos morfológicos
 546 esenciales para asegurar una precisión hidrológica máxima. Como parte de nuestro apego a la transparencia
 547 y la accesibilidad en la investigación, publicamos la base de datos generada en repositorio disponible al
 548 público, sistematizamos un protocolo completamente reproducible y desarrollamos una base de código abierto,
 549 posicionándola como una herramienta esencial para futuros estudios en hidrología computacional.

550 La hidrología computacional y el análisis hortoniano de la hidrografía dominicana, han tenido históricamente
 551 poco alcance debido a la limitada disponibilidad de datos detallados y precisos. Previo a nuestro trabajo,
 552 las fuentes más relevantes para estudios en la región se centraban primordialmente en modelos digitales
 553 de elevación de resolución baja (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National
 554 Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey, 2009), o en la cartografía topográfica
 555 base e investigaciones locales (CIDIAT y INDRHI, 1992; INDRHI, 2012; Instituto Cartográfico Militar (ICM),
 556 1989; Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002).
 557 Estas publicaciones, aunque fundamentales, carecían del nivel de detalle y la sistematización necesaria para
 558 avanzar en la hidrología computacional y el análisis hortoniano.

559 En este contexto de fuentes escasas, Martínez-Batlle (2019b) explora la reorganización del drenaje en una
 560 subcuenca del río Ocoa durante el Pleistoceno superior. A pesar de la relevancia de dicho trabajo, su
 561 aplicabilidad a escala nacional, o incluso local, es limitada. En contraposición, nuestro trabajo contribuye
 562 a llenar este vacío, al ofrecer una perspectiva detallada y amplia, primordial para efectuar análisis tan
 563 profundos como el referido, pero a escala nacional. De esta manera, allanamos el camino para investigaciones
 564 subsecuentes en el dominio de la hidrología computacional.

565 La configuración y densidad de la red de drenaje generada por nosotros, resalta claramente la influencia de la
 566 fisiografía y la diversidad litológica de República Dominicana. La densidad de drenaje no es aleatoria; está
 567 determinada por factores específicos como la permeabilidad de las rocas y el suelo, la cantidad de precipitación,
 568 el tamaño de la cuenca y sus características topográficas (Culler et al., 1961). En áreas caracterizadas por
 569 rocas impermeables, como margas y esquistos, así como otras que al intemperizarse producen suelos de textura
 570 fina, es típico encontrar densidades de drenaje y razones de bifurcación elevadas (Anderson y Anderson, 2010;
 571 Horton, 1932; Horton, 1945; Strahler, 1957). Dichas condiciones son prevalentes en regiones como el borde
 572 meridional de la cordillera Central, la cordillera Septentrional, la cordillera Oriental y la sierra de Yamasá
 573 (Mollat et al., 2004; Pérez Estaún et al., 2007), lo cual explica la jerarquía alcanzada por ríos como el Yaque
 574 del Sur, Macasía-Artibonito, Ozama, Yuna e Higuamo. Por otra parte, no podemos precisar si los valores
 575 elevados de densidad de drenaje en subcuencas del río Yaque del Sur ubicadas sobre margas y fangos, están
 576 asociados, conjuntamente con la litología, a las mayores intensidades de precipitación comúnmente observadas
 577 en esta zona del país, lo cual constituye una pregunta abierta que requerirá futura investigación.

578 Nuestra red refleja la harmonización con los elementos morfoestructurales del país, un sistema alternante
 579 de cordilleras y amplios valles fluviales, dispuestos predominantemente en dirección noroeste-sudeste. Esta
 580 disposición, moldeada por procesos geotectónicos históricos y contemporáneos, guía la orientación de ríos
 581 prominentes como el Yuna-Camú, Yaque del Norte y Yaque del Sur.

582 Asimismo, es innegable el impacto de los sistemas kársticos en la organización de la red de drenaje. En este
 583 contexto, el karst de Los Haitises es el más destacado, influyendo significativamente en la estructuración de la
 584 red hidrográfica. Su característica de sumidero, vinculada a la repetición monótona de dolinas con ponors
 585 que dirigen flujos de agua hacia el endokarst, marca la ausencia de escorrentía superficial jerarquizada entre
 586 la sierra de Yamasá y la cordillera Oriental. Se observan influencias análogas, aunque de menor extensión,
 587 en áreas del karst de plataforma de la llanura sudoriental, en la cordillera Septentrional y en las sierras de
 588 Bahoruco y Neyba.

589 La Española es una isla originada a partir de una colisión derivada de la convergencia oblicua entre la
 590 Placa Norteamericana y el arco-isla Cretácico caribeño (Pérez Estaún et al., 2007). Esto significa que se
 591 trata de un país con un activo pasado geológico, donde los procesos de reorganización del drenaje, resultado
 592 de la interacción entre litología, tectónica y clima a lo largo del tiempo, han debido ser frecuentes. En
 593 general, los ríos con trazado tortuoso, caracterizados por largos rodeos entre su origen y desembocadura, a
 594 menudo son indicativos de una reorganización del drenaje, como por ejemplo, captura fluvial (Bishop, 1995).
 595 Biogeográficamente, tales reorganizaciones tienen consecuencias significativas, por lo que constituyen una
 596 línea de investigación muy activa en varios sistemas fluviales del mundo (Barreto et al., 2022; Musher et al.,
 597 2022). Nuestro análisis mostró varios casos de ríos cuyo curso más largo sigue un trazado de amplio rodeo,
 598 con giros bruscos en distintos puntos de sus respectivos recorridos, como por ejemplo los ríos Yaque del
 599 Norte, Yaque del Sur y Ozama. Contrariamente, los ríos con trazados rectilíneos podrían representar una
 600 fase evolutiva más reciente de la isla, tal como ocurre en los ríos Nizao, Haina e Higuamo. Estos patrones,
 601 en su conjunto, proporcionan una comprensión profunda de cómo los procesos geomorfológicos, tectónicos,
 602 climáticos y biológicos interactúan, modelando tanto el paisaje como la biodiversidad dominicanos.

603 Nosotros pudimos comprobar la relación exponencial entre el orden de red y distintas variables morfométricas
 604 de la estadística hortoniana, como la razón de bifurcación, el área de cuencas y las longitudes de cursos, entre
 605 otros (Horton, 1945). En cuanto a la razón de bifurcación, esta sigue la regla del número de cursos o corrientes,
 606 que expresa la relación existente entre el número de cursos de un orden dado y el orden del curso en términos
 607 de una serie geométrica inversa. Los valores de razón de bifurcación de ámbito nacional obtenidos por nosotros
 608 ($R_b > 4.5$), tanto mediante regresión como por promedios, superan el valor comúnmente observado en este
 609 tipo de estudios ($3.5 < R_b < 4$). Este resultado lo asociamos con el umbral de acumulación elegido por
 610 nosotros para crear la red, de 8 ha, dado que se espera que a menor umbral de acumulación, mayor razón de
 611 bifurcación. No obstante, dado que los estudios realizados en el siglo pasado se basaban en extracciones de la
 612 red a partir de mapas topográficos de escala 1:50,000, es esperable que nuestra red, al ser más densa, alcance
 613 razones mayores.

- 614 Un aspecto destacable de nuestros resultados es la observación de que los cursos o corrientes de órdenes 5 y 6
 615 presentan, en promedio, diferencias de elevación superiores en comparación con los otros órdenes jerárquicos
 616 (1 a 4, y 7 a 8). Esta característica singular podría tener su origen en la posición geomorfológica donde ocurren
 617 estos cursos, preferentemente en zonas de transición, específicamente en enlaces con piedemontes. Estas áreas
 618 suelen mostrar rasgos morfológicos donde el drenaje experimenta una expansión vertical acusada, es decir, un
 619 cambio de elevación del terreno de manera abrupta, sin que ello esté asociado con un incremento en el orden
 620 de la red. Esta situación indica que en estas zonas, las dinámicas geomorfológicas podrían estar favoreciendo
 621 un relieve más pronunciado, sin necesariamente acompañarse de una mayor complejidad en la estructura de
 622 drenaje. Nuestra interpretación resalta la importancia de considerar no solo la jerarquía fluvial, sino también
 623 la geomorfología local, al evaluar las características morfodinámicas de una cuenca.
- 624 Nuestros resultados presentan limitaciones, inherentes a todo estudio, que es preciso abordar en esta sección. En
 625 primer lugar, la precisión posicional de la red varía significativamente dependiendo de la geomorfología. Si bien
 626 es alta en sistemas montañosos no kársticos, se modera en terrenos kársticos y disminuye en grandes llanuras
 627 y zonas de desembocadura. Específicamente, en los relieves kársticos, enfrentamos una alta incertidumbre
 628 dada la carencia de un catálogo exhaustivo de depresiones con drenaje endorreico, como las dolinas con
 629 ponors activos, lo cual es esencial para definir la topología y jerarquización de la red en dichos morfosistemas.
 630 Explicamos que, ante esta limitación, desarrollamos un inventario propio de depresiones basado en el propio
 631 DEM, el cual consideramos suficiente para nuestros fines, pero limitado para aplicaciones más amplias sobre
 632 infiltración en el karst. También es pertinente añadir que en zonas urbanas, áreas llanas, terrenos con sistemas
 633 de riego y áreas de desembocadura (por ejemplo, en los ríos Yaque del Sur y Yuna), la precisión de nuestra
 634 red puede verse muy comprometida. Sin embargo, dado que nuestro objetivo se centra en la generación
 635 sistemática de la hidrografía densa, con énfasis en las áreas de montaña, el error posicional inherente no
 636 menoscaba la relevancia de nuestros resultados.
- 637 En lo concerniente a las cuencas y redes de drenaje transfronterizas, cabe señalar que las extraídas por
 638 nosotros se basan exclusivamente en datos del territorio dominicano. Esto significa que el orden de red máximo
 639 reportado para estas redes podría no ser representativo de su orden verdadero. A pesar de esta restricción,
 640 nuestro análisis visual preliminar sugiere que no compromete el objetivo central de nuestro estudio. Es una
 641 línea que, en futuras investigaciones, será abordada de forma integral, ofreciendo una visión más acabada de
 642 su morfometría.
- 643 Por último, en cuanto a las limitaciones esbozadas, para nosotros es importante aclarar el alcance de nuestra
 644 singular propuesta nuestra investigación. A diferencia de los enfoques convencionales que se articulan en
 645 torno a preguntas e hipótesis, el nuestro se centra en la generación y exposición de datos, así como en la
 646 producción de código reproducible. Dado el énfasis en la construcción de la red hidrográfica y la metodología
 647 rigurosa empleada, entendemos este trabajo como un aporte esencialmente de carácter metodológico y para
 648 la producción de datos, llenando un hueco en la bibliografía y generando una base de datos y de código para
 649 futuros estudios sobre la hidrografía dominicana y de otros territorios.
- 650 A partir de los resultados obtenidos y las observaciones registradas en el presente estudio, es posible identificar
 651 diversas vías de investigación futura que podrían enriquecer la caracterización de los sistemas hídricos
 652 dominicanos realizada en el presente estudio. Nuestra primera consideración se centra la precisión del modelo
 653 de elevación utilizado. Entendemos que es crucial realizar una evaluación detallada de la precisión para
 654 cuantificar el error posicional de la red hidrográfica derivada, lo cual podría contribuir a potenciar la robustez
 655 de resultados futuros. Una de propuesta de investigación relacionada, consiste en colectar puntos mediante
 656 receptores GNSS en el terreno y realizar, por distintos métodos, una revisión de precisión y rectificación del
 657 modelo. Dado que las áreas llanas presentan mayores retos, sería beneficioso refinar la hidrografía de estas
 658 zonas a medida que se mejoren la precisión del modelo.
- 659 Por otra parte, los hallazgos del presente estudio pueden allanar el camino para investigaciones que se
 660 adentren en fenómenos de reorganización de drenaje, incorporando métricas más sofisticadas. Para una mejor
 661 comprensión de los fenómenos geomorfológicos, sería oportuno explorar el índice de concavidad, la hipsometría,
 662 el índice χ y las métricas de Gilbert, tal como se ha realizado para distintas regiones en años recientes (Dal
 663 Pai et al., 2023; Forte y Whipple, 2018; Harkins et al., 2007; Maneerat y Bürgmann, 2022; Pereira de Oliveira
 664 et al., 2023). Al mismo tiempo, un enfoque individualizado en las cuencas, particularmente de aquellas de
 665 orden cuatro o superior, podría proporcionar analíticas específicas sobre la dinámica y características de
 666 dicho subconjunto.
- 667 Además, la morfometría de redes y cuencas debería recibir una atención especial en futuros estudios. Este
 668 enfoque permitiría un entendimiento más profundo de las propiedades y el comportamiento de la red fluvial y
 669 de las cuencas en general. Paralelamente, sería provechoso realizar análisis hortonianos más exhaustivos, que

670 aborden la estructura, jerarquía y distribución espacial de las redes de drenaje según rasgos comunes que
 671 ayuden a clasificar mejor la hidrografía dominicana.

672 Por último, resulta esencial estudiar la relación y patrones de asociación entre diferentes variables de las
 673 cuencas (e.g. densidad de drenaje), y a su vez confrontarlas con características del medio físico como la
 674 elevación, pendiente, litología, geomorfología y, particularmente, con el clima. Una dirección prometedora en
 675 la investigación podría explorar si las densidades de drenaje más altas en las cuencas del borde meridional
 676 de la cordillera Central, como en el Cinturón de Peralta, están vinculadas tanto a la litología como al
 677 clima. Herramientas como **r.basin** (de GRASS GIS) podrían facilitar este proceso, revelando interacciones y
 678 correlaciones hasta ahora no identificadas.

679 Finalmente, sobre la relevancia de nuestro estudio, los resultados obtenidos representan un hito en la
 680 investigación hidrológica de la República Dominicana, siendo la primera vez que se aborda la hidrología
 681 computacional a nivel nacional de manera coherente y sistemática. Con la caracterización realizada, hemos
 682 generado una red hidrográfica densa que sirve como base apropiada para realizar comparaciones sistemáticas,
 683 así como numerosos estudios y aplicaciones prácticas.

684 Nuestros resultados tienen potencial para aplicaciones en diversos ámbitos, desde el diseño de estrategias
 685 de conservación de cuencas y la modelización hidrológica en zonas altas y medias, hasta la contribución en
 686 estudios de riesgos y en el diseño de redes hidrométricas. Además, la red generada proporciona una base
 687 idónea para futuras investigaciones sobre la biodiversidad y su conservación, facilitando el diseño de muestreos
 688 de flora y fauna acuática en sistemas fluviales de montaña media y alta.

689 Por otro lado, por nuestro compromiso con la transparencia y la educación, hemos generado una base de
 690 código informático conjuntamente con el protocolo seguido, que no sólo garantizan la replicabilidad del
 691 estudio sino que también se ofrece un valioso recurso didáctico. Estudiantes, tanto de grado como de posgrado,
 692 y profesionales interesados en la hidrología, encontrarán en nuestra investigación una guía detallada para
 693 aplicar métodos similares a otras fuentes de elevación.

694 En conclusión, nuestro estudio abre un camino innovador en la comprensión de la hidrografía de República
 695 Dominicana, fusionando tecnologías y metodologías computacionales con un análisis sistemático a nivel
 696 nacional. La caracterización detallada y sistemática de la hidrografía ha desvelado la intrincada red fluvial
 697 del país, ofreciendo una herramienta invaluable para aplicaciones prácticas y científicas, desde la conservación
 698 de cuencas hasta la modelización hidrológica. Nos hemos apoyado en el rigor metodológico y en las fuentes de
 699 datos de mayor detalle disponibles públicamente, para generar un producto que, aunque reconocemos que
 700 es mejorable, enriquece nuestra comprensión de la geografía física dominicana y sienta un precedente para
 701 investigaciones futuras, estableciendo un marco de referencia que puede ser replicado o adaptado en otros
 702 contextos y regiones. La combinación de datos, protocolos y análisis que hemos presentado en este trabajo,
 703 junto con la relevancia de su contenido, evidencia la trascendencia de la investigación.

704 Declaración de conflicto de intereses

705 El autor y la autora declaran que no tienen ningún conflicto de interés con el contenido de este artículo.

706 5. Contribución de autores

707 JM y MI conceptualizaron y diseñaron el estudio. JM se encargó de la recopilación de datos. JM y MI
 708 establecieron la metodología y llevaron a cabo la investigación. JM desarrolló el software y la supervisión fue
 709 realizada por MI. Ambos validaron el trabajo. JM estuvo a cargo de la visualización y redactó el borrador
 710 original, mientras que la revisión fue realizada por MI.

711 Disponibilidad de datos, scripts y código

712 Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en Zenodo en <https://doi.org/10.5281/zenodo.8365294> (Martínez-Batlle y Izzo-Gioiosa, 2023). Los scripts utilizados para
 713 la curación de datos, análisis y visualización están disponibles en esta sección, así como en el repositorio
 714 de GitHub en <https://github.com/geofis/red-hidrografica-densa-rd> y en Zenodo en <https://doi.org/10.5281/zenodo.8370346> (Martínez-Batlle, 2023).

717 **Información suplementaria**

718 **Suplemento metodológico para la subsección “Obtención y Preprocesamiento del DEM”**

719 Los siguientes bloques de código cargan los paquetes de uso común a lo largo de este cuaderno, así como
 720 funciones creadas por nosotros para eficientizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas.
 721 Igualmente, aprovechamos este bloque de código para declarar la ruta del directorio donde se alojan los
 722 archivos fuente, la cual reprovechamos en distintas partes del código.

```
conflicted::conflict_prefer("select", "dplyr")
conflicted::conflict_prefer("filter", "dplyr")
conflicted::conflict_prefer("distance", "raster")
conflicted::conflict_prefer("alpha", "ggplot2")
conflicted::conflict_prefer("rescale", "scales")
library(psych)
library(raster)
library(sf)
library(kableExtra)
library(tidyverse)
library(gdalUtilities)
library(e1071)
library(scales)
library(tmap)
library(janitor)
library(ggrepel)
library(ggsflabel)
library(spanish)
source('R/funciones.R')
rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T)) #Borrar resúmenes sesión anterior
dem_proc_dir <- 'estadisticos'
figuras <- 'figuras'
umbral_espurias <- 4000 #Umbral por debajo del cual se considera una cuenca como espuria
```

723 Descargamos 42 escenas ALOS PALSAR RTC, específicamente los *Hi-Res Terrain Corrected*, desde el
 724 Centro de Archivo Activo Distribuido (DAAC) del Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014), para
 725 posteriormente depurarlas y seleccionar las más idóneas para unirlas en un mosaico creado como ráster virtual.
 726 La descarga la realizamos por lotes, usando un *script* de Python provisto por el propio ASF.

```
python download-all-2023-04-20_00-30-00.py
```

727 Al momento de realizarse esta investigación, la tendencia en el análisis de datos geoespaciales
 728 apuntaba hacia enfoques basados en la nube, como Google Earth Engine y Microsoft Planetary
 729 Computer. Nosotros usamos regularmente estas plataformas en nuestras investigaciones, pero
 730 ciertos algoritmos esenciales para el análisis hidrológico aún no se encuentran disponibles en
 731 estos servicios. Por esta razón, nos vimos en la necesidad de utilizar nuestros propios equipos
 732 informáticos (Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz, 64 GB de memoria RAM, unidad
 733 de estado sólido NVMe, corriendo bajo Ubuntu 20.04) y, aunque conseguimos paralelizar
 734 ciertos procesos, la mayoría de los algoritmos de hidrología computacional no utilizan
 735 eficientemente los múltiples núcleos de los procesadores, resultando en una subutilización
 736 de la capacidad de memoria y en procesamientos más lentos que los que comúnmente se
 737 conseguirían en la nube.

738 Identificamos las escenas necesarias para cubrir íntegramente la República Dominicana, usando una búsqueda
 739 geográfica mediante polígono delimitador en ASF. Dado que la misión del ALOS-PALSAR ofrece escenas
 740 de distintas fechas para una misma área, las descargamos todas y posteriormente excluimos del análisis las
 741 redundantes, conservando siempre la más reciente. Utilizando el índice de huellas de escenas, escribimos un
 742 pequeño programa para seleccionar las más recientes allí donde hubiese redundancia. Con esto construimos
 743 un índice de DEM para guiarnos durante la construcción del ráster virtual.

```

ind_orig <- invisible(
  st_read('alos-palsar-dem-rd/asf-datapool-results-2023-04-19_08-31-26.geojson',
    quiet = T)) %>%
  rownames_to_column('fila') %>% mutate(fila = as.integer(fila))
distancias <- ind_orig %>% st_centroid() %>% st_distance() %>% units::drop_units()
distancias[upper.tri(distancias, diag = T)] <- NA
indices <- which(distancias < 1000, arr.ind = TRUE)
duplicados <- as.data.frame(indices) %>%
  mutate(dup_id = 1:nrow(indices)) %>%
  pivot_longer(-dup_id, names_to = 'tipo', values_to = 'fila') %>%
  select(-tipo)
seleccionados <- duplicados %>%
  inner_join(ind_orig %>% select(fila, startTime) %>% st_drop_geometry()) %>%
  group_by(dup_id) %>% filter(startTime == max(startTime)) %>% pull(fila)
ind_orig_sel <- ind_orig %>%
  filter(!fila %in% duplicados$fila | fila %in% seleccionados) %>%
  filter(centerLon < -72.1821)

ind_orig_sel %>% select(sceneName, startTime) %>% st_drop_geometry() %>%
  estilo_kable(titulo = paste('Escenas ALOS-PALSAR usadas para generar un DEM de 12.5 m de
                                resolución espacial de República Dominicana'))

```

Tabla S1: Escenas ALOS-PALSAR usadas para generar un DEM de 12.5 m de resolución espacial de República Dominicana

sceneName	startTime
ALPSRP253240380	2010-10-25 23:18:16
ALPSRP253240370	2010-10-25 23:18:08
ALPSRP253240360	2010-10-25 23:17:59
ALPSRP253240350	2010-10-25 23:17:51
ALPSRP252510370	2010-10-20 23:11:46
ALPSRP252510360	2010-10-20 23:11:38
ALPSRP252510350	2010-10-20 23:11:30
ALPSRP251490380	2010-10-13 23:22:45
ALPSRP251490370	2010-10-13 23:22:36
ALPSRP251490360	2010-10-13 23:22:28
ALPSRP251490350	2010-10-13 23:22:20
ALPSRP251490340	2010-10-13 23:22:12
ALPSRP250760380	2010-10-08 23:16:23
ALPSRP250760370	2010-10-08 23:16:15
ALPSRP250760360	2010-10-08 23:16:06
ALPSRP250760350	2010-10-08 23:15:58
ALPSRP250030360	2010-10-03 23:09:44
ALPSRP250030350	2010-10-03 23:09:36
ALPSRP248280370	2010-09-21 23:14:21
ALPSRP248280360	2010-09-21 23:14:13
ALPSRP248280350	2010-09-21 23:14:05
ALPSRP247260360	2010-09-14 23:25:03
ALPSRP247260350	2010-09-14 23:24:55
ALPSRP247260340	2010-09-14 23:24:47
ALPSRP242300380	2010-08-11 23:21:28
ALPSRP242300370	2010-08-11 23:21:19
ALPSRP242300360	2010-08-11 23:21:11
ALPSRP242300350	2010-08-11 23:21:03

744 En total, para cubrir el territorio de República Dominicana, necesitamos 28 de escenas únicas ALOS PALSAR
 745 RTC. Señalamos en este punto un detalle relevante para el análisis hidrológico. Las escenas correspondientes
 746 a la porción haitiana del río Artibonito, no las procesamos en este estudio, a efectos de agilizar la producción
 747 de resultados. No obstante, dicha tarea nos quedó pendiente para futuras investigaciones.

```
ind_orig_sel_m <- ind_orig_sel %>%
  ggplot +
  geom_sf(alpha = 0.6, fill = 'grey90', color = 'grey20', size = 0.5) +
  geom_sf(data = pais, fill = 'transparent', color = 'black') +
  ggplot2::geom_sf_label(aes(label = sceneName), color = 'red', size = 1.5,
    label.padding = unit(0.1, "lines"), alpha = 0.9) +
  theme_bw() +
  theme(plot.title = element_text(size = 11)) +
  ggspatial::annotation_scale(style = 'ticks')
```

748 Usando como referencia el índice de escenas seleccionadas, extrajimos los DEM correspondientes, incluidos
 749 en formato GTiff dentro de los archivos comprimidos (.zip). Este formato es proporcionado por el Alaska
 750 Satellite Facility para minimizar el uso del ancho de banda durante las descargas, lo que resulta beneficioso
 751 para el rendimiento de sus servidores. A pesar de estar comprimidos, la descompresión de estos archivos no
 752 supone un proceso largo o laborioso.

```
zip_path <- 'alos-palsar-dem-rd/'
sapply(ind_orig_sel$file_name,
  function(x)
    unzip(
      zipfile = paste0(zip_path, x),
      exdir = paste0(zip_path, 'dem'), junkpaths = T,
      files = paste0(gsub('.zip', '', x), '/', gsub('zip', 'dem.tif', x)))
)
```

753 Todos los DEM fueron proporcionados por ASF en el sistema de coordenadas Universal Transversal de
 754 Mercator (UTM). Sin embargo, los situados al oeste fueron suministrados en el huso 18N. Identificamos estos
 755 DEM y los transformamos al huso 19N, que es el que corresponde a nuestra área, con el objetivo de generar
 756 un producto continuo. Para realizar esta transformación, empleamos la herramienta gdalwarp de la biblioteca
 757 GDAL (GDAL/OGR contributors, 2022).

```
dems_orig_path <- list.files(path = 'alos-palsar-dem-rd/dem',
  pattern = '*dem.tif', full.names = T)
crs_18n <- names(which(sapply(dems_orig_path, function(x){
  crs_x <- gdal_crs(x)
  is_z18 <- grepl('zone 18N', crs_x[['wkt']])
})))
sapply(crs_18n, function(x) file.rename(from = x, to = gsub('.tif', '_z18n.tif', x)))
crs_18n_ren <- list.files(path = 'alos-palsar-dem-rd/dem',
  pattern = 'z18n.tif', full.names = T)
sapply(crs_18n_ren, function(x){
  gdalwarp(
    srcfile = x,
    dstfile = gsub('_z18n.tif', '.tif', x),
    t_srs = 'EPSG:32619', overwrite = T)})
```

758 A efectos de eficientizar la manipulación del DEM, creamos un ráster virtual (VRT) usando la herramienta
 759 gdalbuildvrt de la biblioteca GDAL. Un ráster virtual es básicamente la abstracción de una imagen que
 760 se genera *on the fly*, creado a partir de un índice de tamaño pequeño, en formato XML, que apunta a los
 761 archivos originales sin moverlos ni alterarlos. Tienen las mismas prestaciones que las imágenes guardadas
 762 permanentes guardadas en disco, por lo que con un ráster virtual podemos visualizar un mosaico continuo
 763 o realizar análisis intermedios, o evaluar un producto antes de crearlo de forma definitiva. Se trata de un
 764 formato muy eficiente que ayuda a ahorrar espacio en disco.

```
764
765 gdalbuildvrt(gdalfile = dems_orig_path,
766     output.vrt = paste0(paste0(zip_path, 'dem'), '/dem_seamless.vrt'),
767     resolution = 'highest', r = 'average')
```

765 Posteriormente, creamos la base de datos y localización de GRASS GIS usando como fuente de extensión y
 766 resolución el ráster virtual (GRASS Development Team, 2023). Decidimos usar GRASS GIS a partir de este
 767 punto para prácticamente todas las tareas de análisis geoespacial e hidrológico, pues se trata de un software
 768 bastante eficiente en muchos de sus complementos y algoritmos de serie (e.g. relleno de nulos). Sin embargo,
 769 en pasos posteriores, alternamos el flujo de procesamiento con otras herramientas, como WhiteboxTools
 770 (Lindsay, 2018). En todo caso, nuestro criterio fue siempre aprovechar al máximo los recursos de hardware y
 771 software disponibles para obtener los productos requeridos en el menor tiempo posible.

```
# Usando Bash, desde la ruta ./alos-palsar-dem-rd/dem
grass --text -c dem_seamless.vrt ./grassdata
# Para abrir luego de cerrada: grass grassdata/PERMANENT/
```

772 Luego creamos una máscara de país en QGIS (QGIS Development Team, 2021), superponiendo el límite
 773 oficial obtenido desde la página de la Oficina Nacional de Estadística (ONE), y combinándolo con otras
 774 fuentes disponibles en línea, como GADM, Humanitarian Data Exchange (OCHA) y OpenStreetMap (GADM,
 775 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018; OpenStreetMap contributors, 2017). De la
 776 máscara, eliminamos las superficies de máximas de lagos y lagunas no artificiales, pues nos interesa procesar
 777 las cuencas endorreicas que drenan hacia ellos. No obstante, los embalses no los incluimos en dicha superficie,
 778 dado que necesitamos construir la jerarquía de red ignorando su presencia, es decir, asumiendo como continuos
 779 todos los cursos fluviales. Sobre esta máscara, creamos un área de influencia, para recortar el DEM con un
 780 cierto “acolchado” que nos permitiera analizar sin dificultades las áreas costeras y de frontera. La creación de
 781 esta máscara fue el único paso que realizamos de forma semimanual, pues el resto del flujo de procesamiento
 782 lo realizamos con algoritmo automáticos.

783 Posteriormente, importamos la máscara generada a la base de datos de GRASS y la aplicamos. GRASS opera
 784 de forma eficiente, circunscribiendo la aplicación de los algoritmos al área definida como máscara. Las áreas
 785 fuera de ésta son excluidas, eficientizando los recursos y evitando malgastar tiempo de CPU en áreas que
 786 ajenas al proyecto.

```
# Importar máscara
v.import input=mascara-1km.gpkg output=mascara_1km

# Fijar máscara
r.mask -r
r.mask vector=mascara_1km

# Ver ambiente
g.gisenv
## GISDBASE=/media/jose/datos/alos-palsar-dem-rd/dem
## LOCATION_NAME=grassdata
## MAPSET=PERMANENT
## GUI=text
## PID=1632142
```

787 Importamos el ráster virtual a la base de datos de GRASS GIS con la herramienta `r.import`. Con este paso
 788 generamos un mapa ráster dentro de la base de datos GRASS GIS, el cual es una realización con celdas
 789 manipulables y a la que le podemos aplicar algoritmos ráster de nuestra preferencia.

```
# Importar DEM a región de GRASS
time r.import --overwrite input=dem_seamless.vrt output=dem
## real

# Ver en lista (q para salir)
g.list type=raster
```

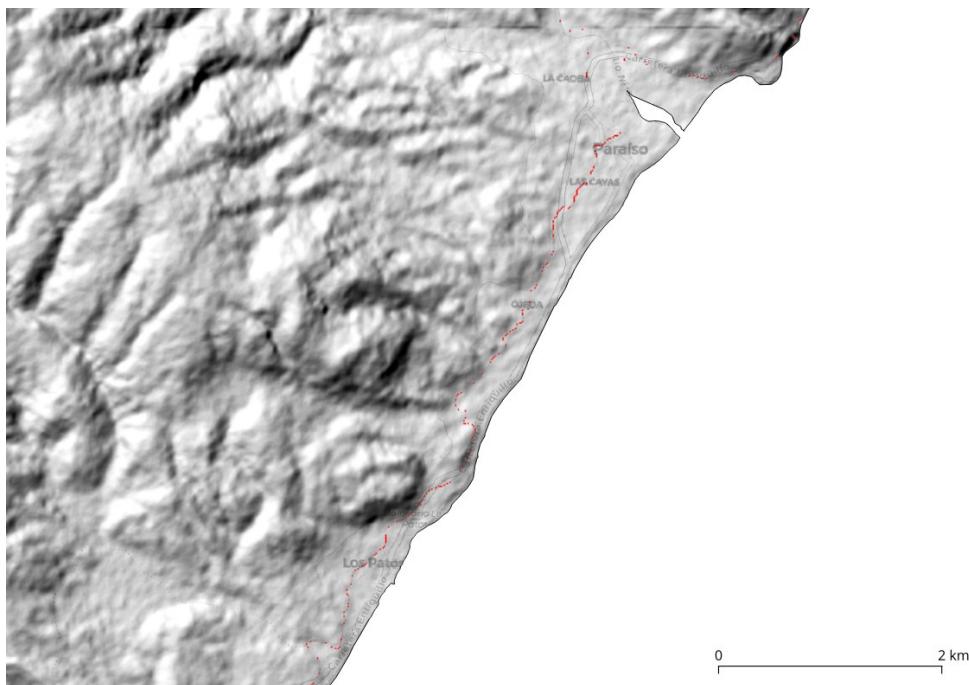


Figura S1: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Nótese los píxeles sin datos, destacados en color rojo (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

790 A continuación, rellenamos las celdas con valor nulo (sin datos) por medio del eficiente complemento de
 791 GRASS `r.fill.nulls`. Lo configuramos para llenar píxeles nulos usando interpolación *spline* bilineal
 792 con regularización Tykhonov (*spline* es un método de descomposición de curvas en porciones descritas por
 793 polinomios).

```
# Rellenar vacíos
time r.fillnulls --overwrite --verbose \
    input=dem method="bilinear" \
    tension=40 smooth=0.1 edge=3 npmin=600 segmax=300 lambda=0.01 \
    output=dem_relleno
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 10m11.925s
```

794 En el siguiente paso suavizamos el DEM preservando morfologías. Para esto usamos la herramienta *FeaturePreservingSmoothing* de WhiteboxTools, la cual reduce la rugosidad generada por el ruido en el DEM
 795 (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Para aplicar esta herramienta, primero exportamos el DEM desde la
 796 base de datos de GRASS GIS a archivo GeoTIFF, y posteriormente aplicamos el suavizado. Finalmente,
 797 importamos el DEM suavizado nuevamente a la base de datos de GRASS GIS para continuar el procesamiento
 798 en dicha aplicación.

```
# Exportar a GTiff con compresión LZW
time r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW,BIGTIFF=YES" \
    input=dem_relleno \
    format=GTiff type=Float64 output=dem_relleno.tif
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m58.924s

# Comenzó a 23.20 de 22 de abril
time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
    --wd='/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/' \
```

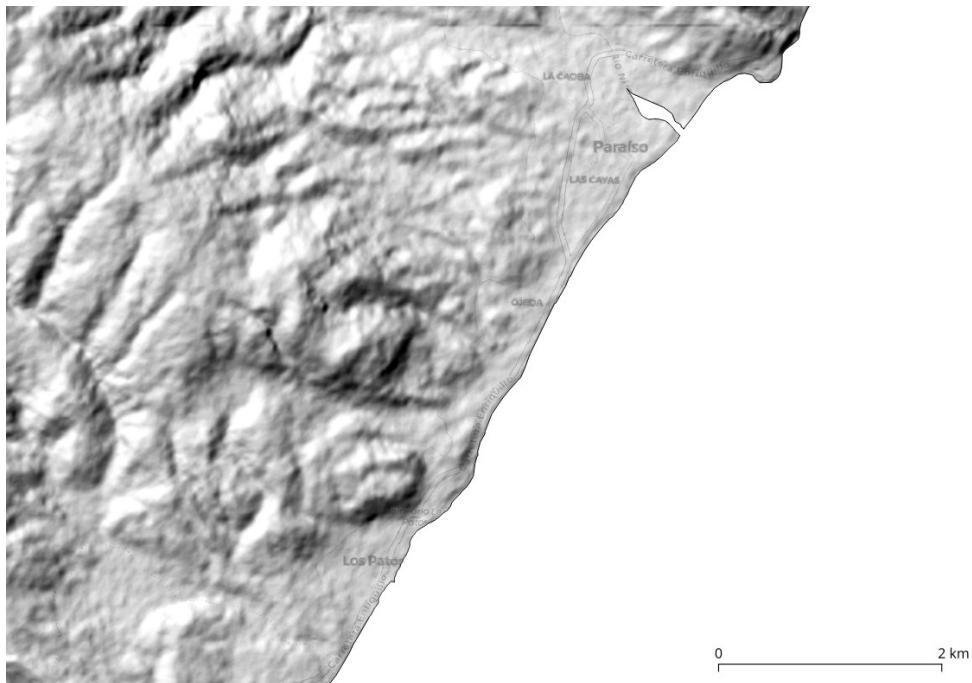


Figura S2: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Los píxeles sin datos fueron eliminados (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```
--filter=25 --norm_diff=45 --num_iter=5 \
--run=FeaturePreservingSmoothing --input='dem_relleno.tif' \
--output='dem_relleno_suavizado.tif' -v
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 9min46.103s
```

```
time r.import input=dem_relleno_suavizado.tif output=dem_suavizado
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m21.593s
```

800 A continuación, usamos el ráster de altura de geoide de La Española a 1 minuto de resolución (EGM2008)
 801 para obtener alturas pseudo-ortométricas, por medio de una suma algebraica simple de este ráster y el DEM
 802 suavizado en GRASS GIS con la herramienta **r.mapcalc**. Sin embargo, previamente fue necesario aumentar
 803 la resolución del ráster de altura del geoide antes de realizar la suma. Para esto, usamos **r.resamp.rst**
 804 (evaluamos una segunda alternativa con el complemento **r.resamp.interp** y, aunque realizó el trabajo
 805 eficientemente, eliminó muchas áreas limítrofes, por lo que preferimos no utilizarlo).

```
# Importar DEM a región de GRASS
r.import --overwrite input=egm2008-1_espanola.tif output=egm2008_1min

# Ver en lista (q para salir)
g.list type=raster

# Ver atributos de la región
g.region -p

# Alternativa 1. Usando r.resamp.rst. Más eficiente y precisa
# Fijar la región al geoide importado
g.region raster=egm2008_1min -ap
# Realizar la interpolación
```

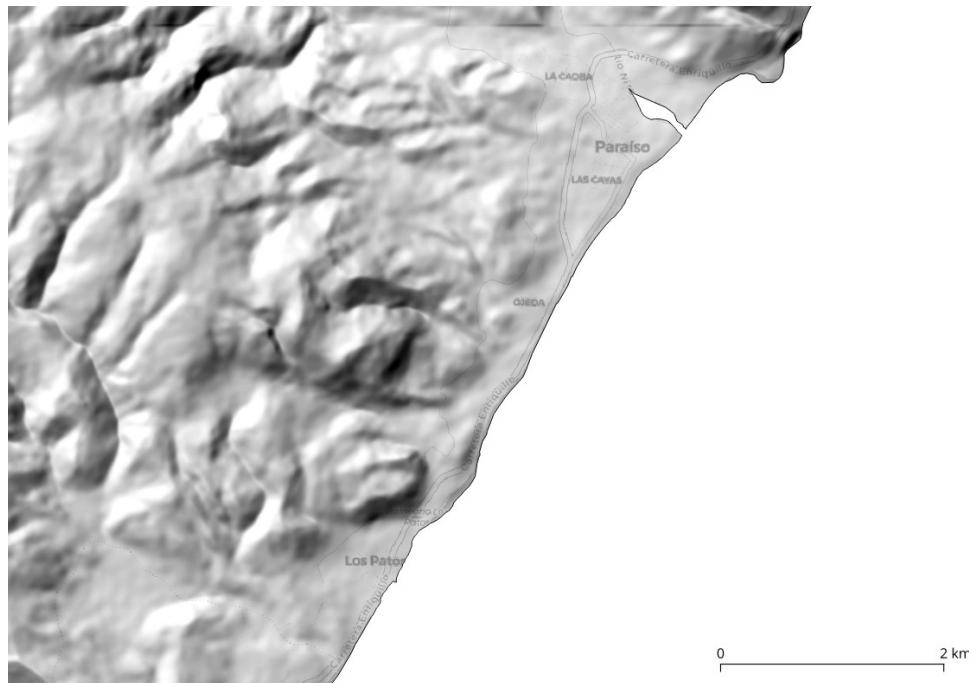


Figura S3: DEM suavizado, representado como relieve sombreado. Nótese la conservación de las morfologías principales y la eliminación del ruido sobre éstas (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```
r.resamp.rst --overwrite input=egm2008_1min ew_res=50 ns_res=50 elevation=egm2008_hires
echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real
# Fijar región a nuevo geóide
g.region raster=egm2008_hires -ap

# Alternativa 2. Usando r.resamp.interp. También eficiente, pero eliminar áreas de borde
# g.region res=50 -ap
# r.resamp.interp --overwrite input=egm2008_1min \
# output=egm2008_hires method=bilinear

# Exportar para explorar visualmente
# r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW" \
# input=egm2008_hires \
# format=GTiff type=Float64 output=egm2008_hires.tif

# Volver a resolución de DEM rellenado y suavizado
g.region raster=dem_suavizado -ap

# Aplicar álgebra de mapas
r.mapcalc --overwrite "dem_pseudo_ortometrico = dem_suavizado - egm2008_hires"

# Estadísticos univariados
r.univar --overwrite -te \
map=dem_pseudo_ortometrico \
output=stats_dem_pseudo_ortometrico.txt

stats_dem_pseudo_ortometrico <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/'),
  header=TRUE,
  sep=' '
)
```

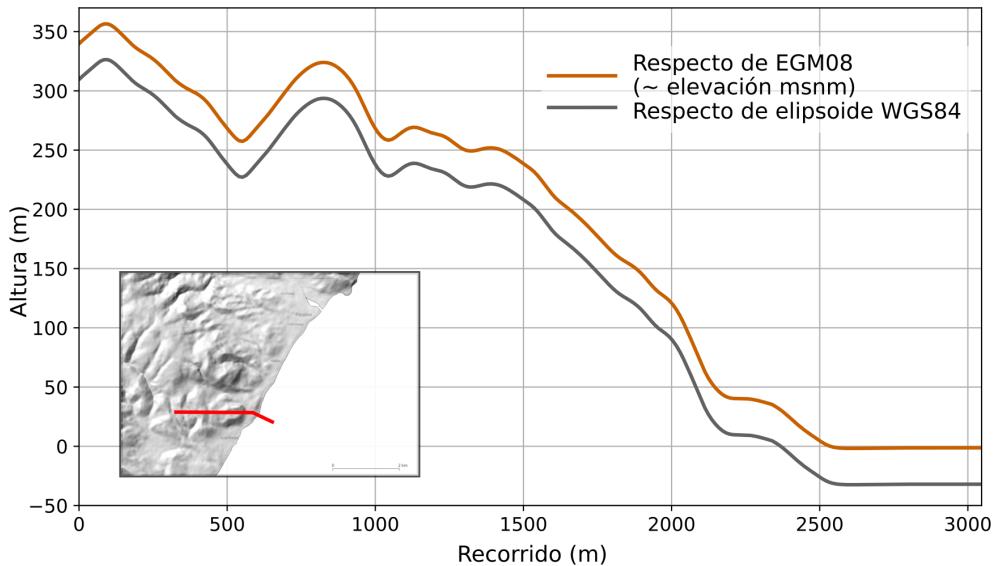


Figura S4: Alturas respecto de geoide EGM08 (~ortométrica) y sobre elipsoide WGS84, de un transecto descendente desde Bahoruco Oriental al Mar Caribe (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```
'stats_dem_pseudo_ortometrico.txt'),
progress = F, show_col_types = F)
```

806 El resumen estadístico proporcionado por la herramienta `r.univar` de GRASS GIS, usando la máscara
 807 ajustada a los límites costeros e internacional del país, informó que la elevación mínima es -51 m, mientras que
 808 la máxima es 3102 m, para un rango de casi 3154 m. El valor mínimo probablemente no está bien recogido,
 809 debido a que la máscara empleada podría estar eliminando elevaciones muy bajas en el área de la Hoya de
 810 Enriquillo. La elevación media, considerando tanto los negativos como los positivos, es de aproximadamente
 811 404 m, con desviación estándar de 487 m y coeficiente de variación de 121 %. Remarcamos que, aunque ASF
 812 advierte de no usar este modelo para fines de elevación, el valor máximo se ajusta bastante a la elevación
 813 máxima conocida en República Dominicana, que es el pico Duarte (Instituto Geográfico Nacional, 2022).

814 A continuación, efectuamos el procedimiento de tallado o grabado de una red preexistente sobre el DEM,
 815 conocido como *stream burning* (Lindsay, 2016). Con este procedimiento, logramos que los píxeles del DEM
 816 intersectados con el vectorial de la red preexistente, adquieran un valor muy bajo respecto de su entorno,
 817 para asegurar que los algoritmos automáticos de análisis hidrológico dirijan el flujo a través de los lechos
 818 de ríos establecidos. El tallado es particularmente útil, incluso esencial, en áreas planas, ya que ayuda a los
 819 algoritmos automáticos a producir redes hidrográficas más realistas y topológicamente correctas. Sin embargo,
 820 su aplicación requiere de una cuidadosa selección de la red preexistente a tallar. Para crearla, usamos una
 821 red de drenaje de cursos fluviales seleccionados, que incluyó sólo los de mayor longitud, comúnmente ríos
 822 permanentes, de lecho ancho y claramente establecidos. Nos apoyamos en imágenes satelitales (Google; Airbus,
 823 Airbus; Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023) y, ocasionalmente, en
 824 el MTN-50K (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989). Complementamos con OpenStreetMap contributors
 825 (2017), ya que este servicio provee información vectorial de fácil acceso y precisa. El resultado consistió en una
 826 red de cursos seleccionados para el tallado del DEM, representada por los ríos Artibonito, Yaque del Norte,
 827 Yuna, Yaque del Sur, varios ríos del extremo meridional de la cordillera Central y del borde sudoriental del
 828 país, así como algunos ríos seleccionados de la cordillera Septentrional.

829 Nuestra de red cursos seleccionados para el tallado contiene varios ríos que atraviesan amplios valles y
 830 karsts, por lo que son comunes los tramos que cruzan zonas complicadas para la conducción del flujo
 831 donde probablemente el error posicional de las líneas es mayor. Cabe también señalar que, para asegurar la
 832 continuidad topológica de la red, dimos un tratamiento especial a los ríos que llenan embalses, los cuales
 833 representamos por medio trazados históricos obtenidos del MTN-50K, omitiendo así la presencia de los
 834 embalses.

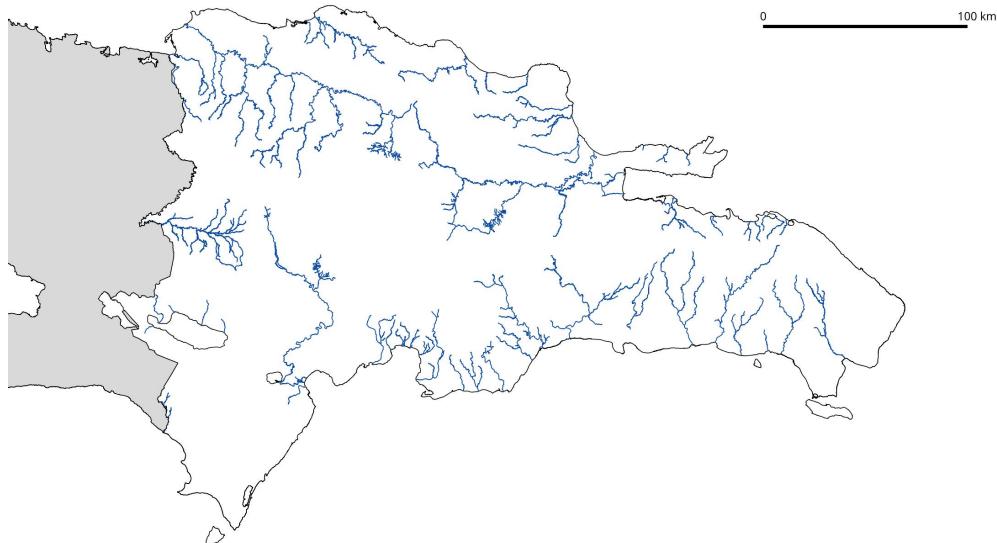


Figura S5: Mapa de la red de cursos largos creada para el estudio a partir de varias fuentes (más detalles, en el texto).

```
# Importar red a GRASS
# IMPORTANTE: la red en el GPKG que se desea tallar, debe tener "1" en el campo "rasterizar"
v.import --overwrite input=red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg \
    output=red_mtn50k_cleaned_largos
# Ver mapa importado en lista (q para salir)
g.list type=vector
# Calcular y pasar a archivo, la longitud de cursos
# y número de segmentos (ejecutar en casos de actualización)
v.to.db -p option=length map=red_mtn50k_cleaned_largos > \
    stats_length_red_mtn50k_cleaned_largos.txt
```

```
stats_red_mtn50k_largos <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/',
         'stats_length_red_mtn50k_cleaned_largos.txt'),
  progress = F, show_col_types = F)
n_seg_red_mtn50k_largos <- stats_red_mtn50k_largos %>%
  filter(!cat == -1) %>% nrow
length_mtn50k_largos <- stats_red_mtn50k_largos %>%
  filter(!cat == -1) %>% pull(length) %>% sum/1000
```

835 Finalmente, importamos nuestra red de cursos seleccionados para el tallado a la base de datos de GRASS
 836 GIS y generamos estadísticas básicas. Se trata de una red compuesta por **388 segmentos** que suman un
 837 total de **5163.66 kilómetros** de longitud. Cabe señalar que esta red no tiene valor hidrográfico, pues, como
 838 indicamos, ignora los lagos para garantizar la integridad topológica. Desaconsejamos su uso para otro fin que
 839 no sea el grabado de un DEM.

840 El siguiente paso consistió en realizar el *stream burning* (tallado) de la red de cursos seleccionados, usando
 841 distintos algoritmos sobre el DEM. Probamos las funciones *r.carve* y *r.mapcalc* (álgebra de mapas) de
 842 GRASS GIS, y *FillBurn* de WhiteboxTools (GRASS Development Team, 2022a; Lindsay, 2018). Sin embargo,
 843 es importante señalar que, dependiendo del algoritmo usado, el grabado modifica de forma diferente el DEM.
 844 Además, algunos algoritmos modifican no solamente los píxeles intersectados sino también otros píxeles,
 845 incluso pueden llegar a cambiar los valores en el DEM completo. Nosotros priorizamos un método de grabado
 846 que fuese efectivo pero que a la vez produjese la mínima alteración sobre el DEM.

847 Comenzamos con `r.carve`, una herramienta diseñada para grabar el DEM sin modificarlo sustancialmente,
 848 permitiendo al mismo tiempo configurar la profundidad y la anchura del grabado (GRASS Development
 849 Team, 2022b; Petrasova et al., 2011). Por defecto, la anchura de lecho es equivalente a la resolución del DEM.
 850 La profundidad puede definirse por el usuario, para lo cual nosotros establecimos 100 metros. Pudimos tallar
 851 la red de cursos seleccionados sobre el DEM con esta herramienta, generando un resultado que consideramos
 852 bueno, aunque el proceso ocupó más de 1 hora de tiempo de cómputo. Esta alternativa es recomendada si
 853 resultase imprescindible conservar las propiedades topográficas en el DEM, pero debe tenerse en cuenta que
 854 su rendimiento es muy bajo. En los casos en los que se use un DEM de resolución baja, se recomienda usar
 855 esta alternativa. Sin embargo, a nosotros no nos resultó apropiado este método por razones de rendimiento,
 856 que explicamos a continuación. Para evaluar el rendimiento del DEM tallado, realizábamos un procesamiento
 857 hidrológico abreviado (generación de la acumulación de flujo y extracción de la red con `r.watershed`); si
 858 los productos generados (e.g. red hidrográfica) no nos parecían idóneos, nos veíamos en la necesidad iterar,
 859 editando la red y aplicando el tallado nuevamente. Dado que el complemento `r.carve` era poco eficiente,
 860 preferimos buscar otras opciones de tallado.

```
# Tallar red de cursos seleccionados usando r.carve (ALTERNATIVA DESCARTADA)
# Limpiar red manualmente en QGIS
## Adicionalmente, para mejorar la topología, se puede aplicar
## v.clean directamente en QGIS, o hacerlo en GRASS GIS tras importar
# Aplicar r.carve
# time r.carve --overwrite --verbose raster=dem_pseudo_ortometrico \
#   vector=red_mtn50k_cleaned_largos output=dem_tallado depth=100
# echo "r.carve finalizado" | mail -s "r.carve finalizado" USUARIO@MAIL
## real 97m3.970s
```

861 Posteriormente, probamos el tallado usando álgebra de mapas con herramienta `r.mapcalc` de GRASS GIS
 862 (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022c; Larson et al., 1991; Shapiro y
 863 Westervelt, 1994). Para tallar con álgebra de mapas, primero normalizamos el DEM, generamos una capa
 864 booleana ráster con la red de cursos seleccionados, la restamos al DEM normalizado y luego, para restablecer
 865 los valores originales fuera de las áreas talladas, multiplicamos el ráster resultante de la resta nuevamente por
 866 el rango del DEM (máximo - mínimo). El resultado es un DEM tallado, en el que sólo los píxeles por donde
 867 circula la red quedaron con una profundidad equivalente al rango. Esta alternativa fue la seleccionada por ser
 868 la más eficiente y que menor modificación introdujo en el DEM.

```
# Tallar con álgebra de mapas (ALTERNATIVA ELEGIDA)
# Antes de comenzar, limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS
# Primero, rasterizar red (los píxeles de la red valdrán 1, el resto, nulo)
v.to.rast --overwrite \
  input=red_mtn50k_cleaned_largos type=line use=attr \
  attribute_column=rasterizar \
  output=red_mtn50k_cleaned_largos \
  memory=32000
# La columna "rasterizar" es 0 para cursos que no se rasterizan
# Luego convertir nulos a cero
r.null map=red_mtn50k_cleaned_largos null=0
# A continuación, determinar estadísticas univariantes del DEM
# confirmar que no sufre gran modificación de sus valores extremos
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34
# Finalmente, aplicar el tallado mediante normalización y resta con r.mapcalc
time r.mapcalc --overwrite << EOF
eval(stddem = (dem_pseudo_ortometrico - -51.4456) / (3102.34 - -51.4456), \
      stddemburn = stddem - red_mtn50k_cleaned_largos)
dem_tallado = (stddemburn * (3102.34 - -51.4456)) - 51.4456
EOF
echo "Tallado finalizado" | mail -s "Mensaje sobre tallado" USUARIO@MAIL
## real 1m5.194s
# A continuación, determinar estadísticas univariantes del DEM
```

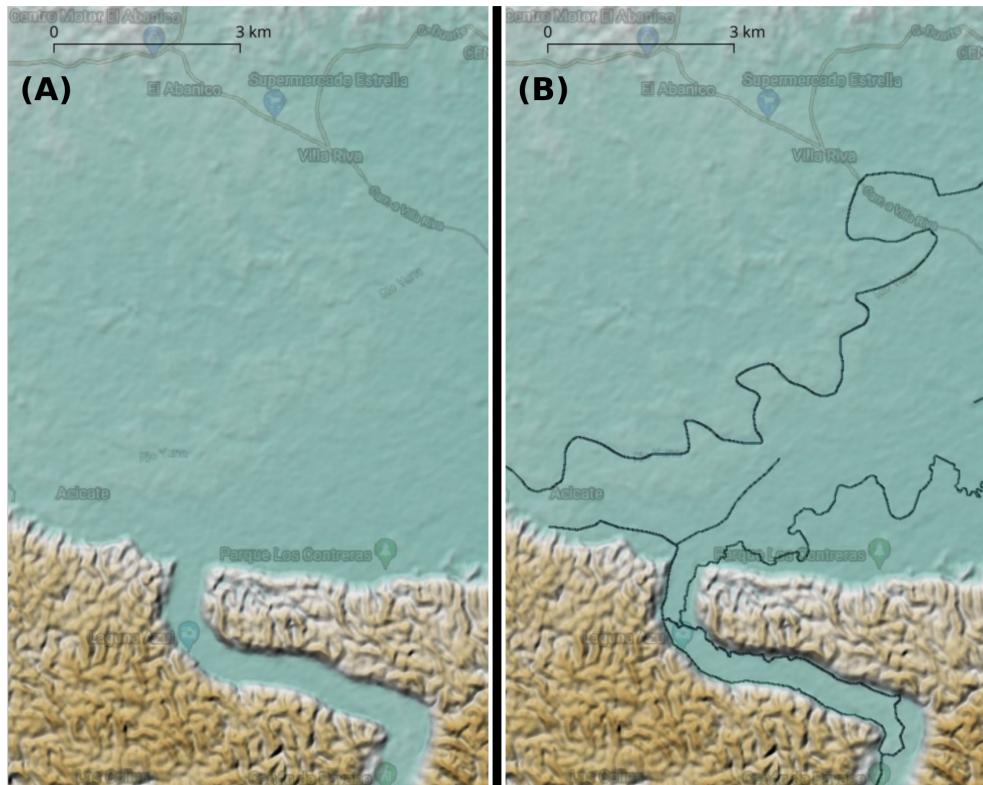


Figura S6: DEM sin aplicación de hidrografía (A), y con aplicación de hidrografía seleccionada o "DEM tallado"(B). El DEM se representa como relieve sombreado y la aplicación se denota como un grabado oscurecido (cañón del río Payabo, Los Haitises, y río Yuna (proximidades de Arenoso, noreste de República Dominicana)

```
# confirmar que no sufre gran modificación de sus valores extremos
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico
```

Como última alternativa de procesamiento, probamos la herramienta **FillBurn**, basada en Saunders (2000) e implementada por Lindsay (2016) en de WBT. **FillBurn** realiza dos modificaciones a la vez sobre el DEM; por una parte, graba la red, usando una profundidad por defecto y, por otro, rellena las depresiones. La herramienta mostró mejor rendimiento que la de GRASS GIS en cuanto a tiempo de cómputo. Tras tallar la red evaluamos el DEM resultante, y comprobamos que **resultó ser muy diferente al original, especialmente en las áreas con depresiones**. Por esta razón, descartamos este DEM y elegimos usar el tallado por medio de álgebra de mapas (**r.mapcalc**) con GRASS GIS en los siguientes pasos de nuestro flujo de trabajo.

```
# Tallar con FillBurn de WhiteboxTools (ALTERNATIVA DESCARTADA)
# Exportar dem_pseudo_ortometrico a GTiff con compresión LZW
# time r.out.gdal --overwrite --verbose createopt="COMPRESS=LZW,BIGTIFF=YES" \
# input=dem_pseudo_ortometrico \
# format=GTiff type=Float64 output=dem_pseudo_ortometrico.tif
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 1m0.248s
```

```
# Exportar red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg a shapefile
# ogr2ogr(
#   src_datasource_name = paste0('/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/',
#                                 'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg'),
#   dst_datasource_name = paste0('/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/','
```

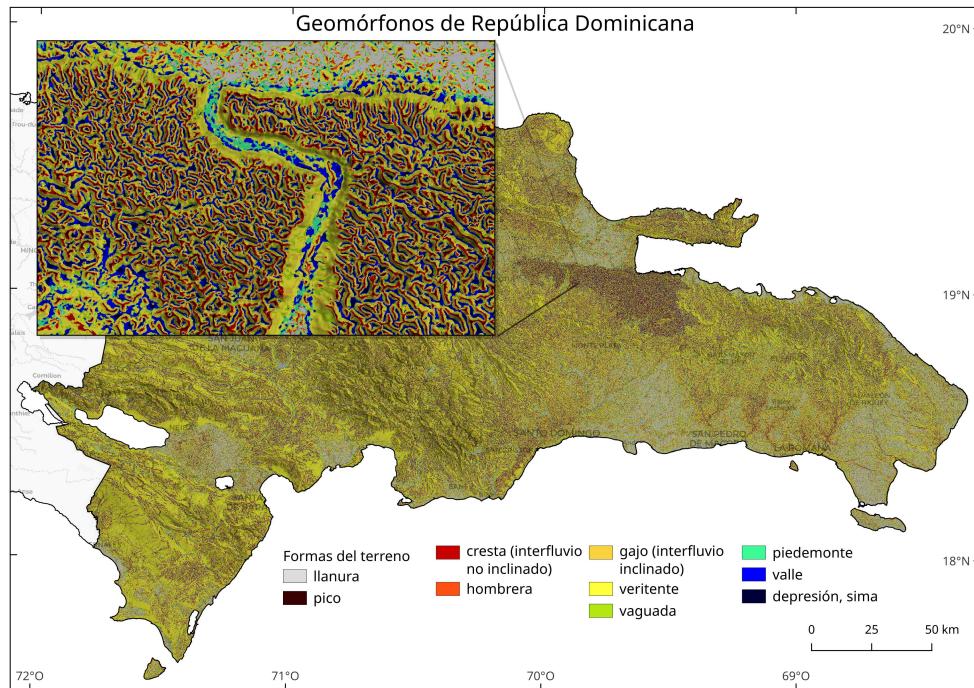


Figura S7: "Geomórfones" de República Dominicana generados a partir de DEM ALOS PALSAR. En cartela, detalle del cañón del río Payabo

```
#           'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.shp'),
#   verbose=TRUE)
```

```
# Tallar finalmente
# time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
#   --wd='/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/' \
#   --run=FillBurn --dem='dem_pseudo_ortometrico.tif' \
#   --streams='red_mtn50k_cleaned.shp' --output='dem_tallado.tif' -v
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 9m21.980s
# Importar a GRASS GIS
# time r.import --overwrite input=dem_tallado.tif output=dem_tallado
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 0m38.519s
```

877 A continuación, implementamos algoritmos para superponer depresiones sobre el Modelo Digital de Elevación
 878 (DEM). Este paso es esencial para guiar el flujo de agua a través de las depresiones, en los lugares donde éstas
 879 sean presentes. Es importante tener en cuenta que sólo se deben superponer aquellas depresiones que tengan
 880 la capacidad de capturar la escorrentía superficial, como los ponores o pérdidas, ya que son estos elementos
 881 los que condicionarán la hidrología en su entorno. El proceso de superposición de depresiones es fundamental
 882 para obtener límites de cuencas y redes de drenaje coherentes.

883 Para generar un conjunto de depresiones, utilizamos la capa de litologías de la República Dominicana,
 884 proporcionada por Mollat et al. (2004). A partir de este recurso, identificamos y separamos las calizas que
 885 presentaban un grado de karstificación suficiente, basándonos en nuestra experiencia de campo. Además,
 886 creamos una capa de depresiones empleando el complemento **r.geomorphon** y utilizando el DEM como
 887 insumo, según el método propuesto por Jasiewicz y Stepinski (2013). También digitalizamos manualmente
 888 algunas depresiones cuya ubicación ya conocíamos a partir de nuestra experiencia en el terreno. Finalmente,
 889 realizamos una intersección de las tres fuentes de datos para producir una capa exhaustiva que refleja las
 890 depresiones capaces de capturar el flujo superficial.

891 No obstante, nuestro resultado debe tomarse con cautela en el relieve kárstico. Como bien es sabido, no
 892 todas las calizas representadas en la geología dominicana están lo suficientemente karstificadas como para
 893 desarrollar depresiones. Por esta razón, usamos la capa de calizas a discreción, y sólo conservamos aquellos
 894 afloramientos de calizas en los que, desde nuestro conocimiento de terreno, no se evidenciaba escorrentía
 895 superficial. Asimismo, reservamos aquellas calizas donde encontramos evidencia de depresiones en la topografía
 896 detallada y en imágenes satelitales. No obstante, gran parte de este trabajo se realizó manualmente, por lo
 897 que nuestra colección de dolinas tiene suficiente precisión, pero no es exhaustiva. Además, es virtualmente
 898 imposible identificar todas las depresiones que funcionan como pérdidas en imágenes satelitales o en mapas
 899 topográficos y geológicos. Finalmente, un elemento adicional complica aún más las cosas en los relieves
 900 kársticos: muchas pérdidas no ocurren a través de una depresión topográficamente visible, pues gran parte de
 901 la infiltración se produce a través de fracturas en la roca, pasando al endokarst y a la zona vadosa de manera
 902 "silenciosa", sin que veamos desde el aire la típica morfología deprimida (e.g. dolina).

```
# Crear geomórfonos
# WBT
# time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
#   -r=Geomorphons -v --wd='/media/jose/datos/alos-palsar-dem-rd/dem/' \
#   --dem=dem_pseudo_ortometrico.tif -o=geomorfonos.tif --search=25 \
#   --threshold=0 --tdist=0.0 --forms
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 6m52.298s #MUY EFICIENTE. Se prefirió la versión de GRASS
## para garantizar flujo de trabajo dentro de la base de datos.
# GRASS GIS
time r.geomorphon \
  --overwrite --verbose \
  elevation=dem_pseudo_ortometrico forms=geomorfonos search=25
echo "r.geomorphon finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.geomorphon" USUARIO@MAIL
## real 33m16.508s #MUY LENTO

# Extraer depresiones desde geomórfonos
r.mapcalc --overwrite \
  expression="'depresiones_geomorfonos' = if(geomorfonos == 10, 1, null())"

# Importar depresiones manualmente digitalizadas a base de datos de GRASS GIS
v.import --overwrite input=depresiones_digitalizadas.gpkg \
  output=depresiones_digitalizadas

# Convertir depresiones digitalizadas manualmente a ráster
v.to.rast --overwrite input=depresiones_digitalizadas \
  type=area use=val output=depresiones_digitalizadas

# Importar la capa de calizas con depresiones en RD (de Mapa Geológico 250K)
v.import --overwrite input=calizas_con_depresiones.gpkg output=calizas_con_depresiones

# Convertir la capa de calizas con depresiones a ráster
v.to.rast --overwrite input=calizas_con_depresiones type=area \
  use=val output=calizas_con_depresiones

# Adjuntar depresiones digitalizadas manualmente con calizas
r.mapcalc --overwrite \
  expression="'depresiones_geomorfonos_calizas' = \
    'depresiones_geomorfonos' * 'calizas_con_depresiones'"

# Unir todas las depresiones en un único mapa
r.patch --overwrite input=depresiones_geomorfonos_calizas,depresiones_digitalizadas \
  output=depresiones_todas
```

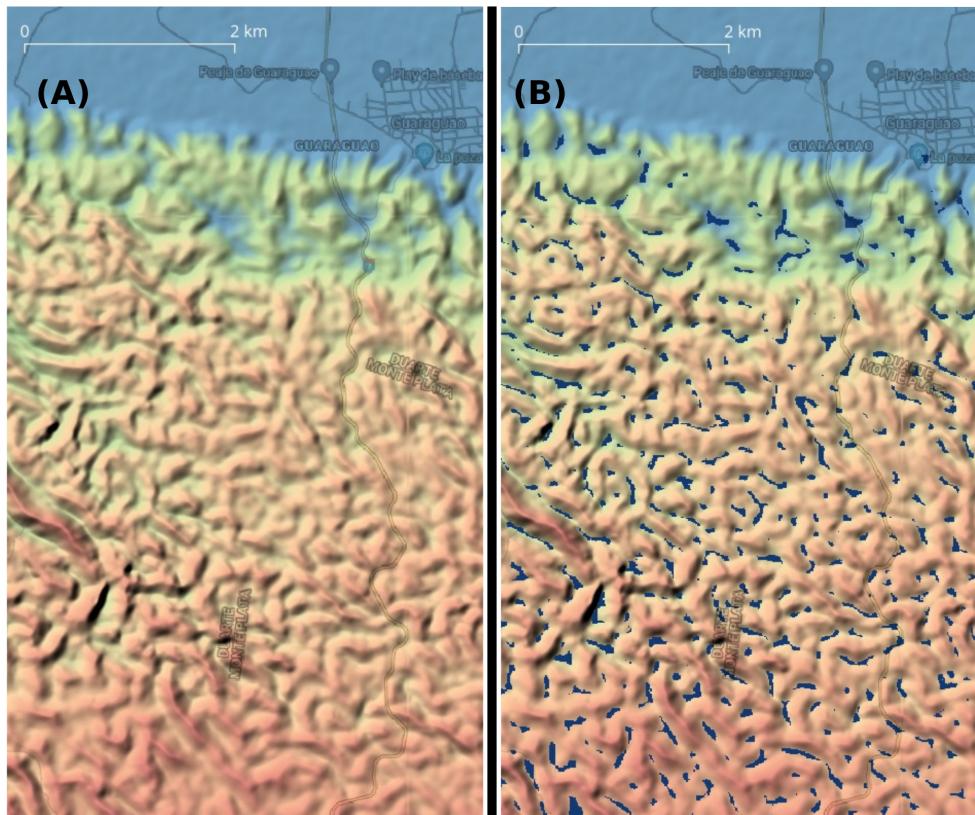


Figura S8: DEM ALOS PALSAR representado como mapa hipsométrico (rojo y marrón representan terreno elevado, verde y azul claro terreno bajo) sobre relieve sombreado, mostrando el área de Guaraguao, Los Haitises, al sur del río Yuna (noroeste de República Dominicana). (A) sin mostrar depresiones, (B) mostrando depresiones en tonalidad azul oscuro

903 Suplemento metodológico para la subsección “Procesamiento de hidrología computacional”

904 Las técnicas de hidrología computacional han experimentado una considerable transformación desde su origen
 905 en el siglo pasado hasta la actualidad, un proceso evolutivo al que han contribuido múltiples entidades
 906 y personas de manera directa (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson et al., 1991;
 907 McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988). De manera
 908 particular, en las últimas dos décadas, se han realizado avances que han expandido el alcance y profundidad
 909 de la hidrología computacional como disciplina, abriendo nuevas fronteras de conocimiento y posibilitando
 910 abordajes más sofisticados y detallados de los fenómenos hídricos. En este proceso, GRASS GIS ha jugado
 911 un papel fundamental, pues no solo ha mantenido activo calendario de lanzamiento de versiones, sino que
 912 también ha ampliado, gracias a comunidad, el número de herramientas de forma significativa.

913 Para realizar análisis de cuencas y redes de drenaje en GRASS GIS, el complemento por excelencia es
 914 **r.watershed** (GRASS Development Team, 2022d), el cual ofrece la posibilidad de crear mapas de acumulación
 915 de flujo usando algoritmos avanzados, y facilita también la tarea de extraer *talwegs* y redes de drenaje, y
 916 delimitar cuencas. Alternativamente, en los casos en los que existe especial interés por el análisis de redes
 917 de drenaje y la jerarquía hidrográfica, se utiliza la familia de complementos **r.stream*** (Jasiewicz y Metz, 2011).
 918 Dentro de esta familia se encuentran **r.stream.extract** para generar la red, **r.stream.order** para calcular
 919 su jerarquía (requiere de los subproductos generados para la herramienta anterior), y **r.stream.basins** para
 920 crear cuencas hidrográficas en función de la jerarquía. En este sentido, debemos elegir apropiadamente entre
 921 **r.watershed** o la familia **r.stream*** según nuestras necesidades y objetivos, o usar ambos si nos interesan
 922 resultados combinados, pero tomando las debidas precauciones.

923 Ambos complementos necesitan de dos mapas derivados para generar productos hidrológicos, los cuales
 924 pueden ser generados por ellos mismos; estos son el mapa de la red propiamente (**stream_rast**), y el de

925 dirección de drenaje (`direction`). En este sentido, debe evitarse combinar mapas generados por algoritmos
 926 distintos para mantener la consistencia (por ejemplo, se desaconseja generar `stream_ras` con `r.watershed`
 927 y `direction` con `r.stream*`, y viceversa), por lo que se recomienda generar ambos mapas por medio del
 928 mismo algoritmo.

929 Considerando que nuestro objetivo principal es la jerarquía de red, podíamos iniciar con `r.stream.extract`
 930 para generar los insumos para `r.stream.order`. Pero dado que este último requiere el mapa de acumulación
 931 flujo, el cual sólo es producido por `r.watershed`, generamos primero este mapa. Por lo tanto, sólo usamos
 932 `r.watershed` para obtener el mapa de acumulación que necesitamos en la aplicación de la familia `r.stream.*`.

933 Previo al inicio de los análisis hidrológicos, aplicamos una máscara ajustada a la línea de costa y los límites
 934 fronterizos del país para evitar que las redes extraídas se extiendan al mar, y creamos una zona de influencia
 935 en el límite fronterizo para permitir la salida y entrada de flujo a través de este. Posteriormente, extrajimos
 936 el mapa de acumulación de flujo.

```
# Importar máscara
v.import --overwrite input=mascara-1km-solo-en-frontera.gpkg \
  output=mascara_1km_solo_en_frontera
# Fijar máscara
r.mask -r
r.mask vector=mascara_1km_solo_en_frontera

# Acumulación de flujo
time r.watershed --overwrite --verbose elevation=dem_tallado \
  depression=depresiones_todas accumulation=rwshed_acum \
  threshold=180 stream=rwshed_talwegs \
  memory=32000
echo "r.watershed finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.watershed" USUARIO@MAIL
## real 10m14.295s
# El umbral 180 se usó en la extracción de una red de muestra, como forma de
# previsualizar una hidrografía inicial, no para generar la red definitiva.
# Dependiendo de la aplicación deseada, otras salidas del addon son:
# drainage=rwshed_direccion_drenaje \
# basin=rwshed_cuencas \
# half_basin=rwshed_hemicuenca \
# tci=rwshed_tci spi=rwshed_spi \
# length_slope=rwshed_longitud_vertiente \
# slope_steeplness=rwshed_empinamiento \
# retention=rwshed_retencion_flujo \
# max_slope_length=rwshed_max_longitud_vertiente \
```

937 Usando como insumos el DEM y el mapa de acumulación producido por `r.watershed`, obtuvimos la red
 938 hidrográfica utilizando `r.stream.extract`. Esta etapa requirió la evaluación de umbrales de acumulación
 939 óptimos a través de inspección visual. El umbral de acumulación es un área de debate en hidrología
 940 computacional. Nos enfocamos en la evaluación de criterios para la extracción de *talwegs* en un sentido amplio,
 941 sin considerarlos como cursos fluviales permanentes. Reconocemos que la determinación de la permanencia
 942 fluvial requeriría un análisis detallado de las características individuales de cada cuenca, incluyendo aspectos
 943 como la pendiente, tamaño, litología y clima.

944 Siguiendo las mejores prácticas, realizamos diversas ejecuciones del complemento `r.stream.extract` usando
 945 varios umbrales para identificar la red hidrográfica más adecuada en nuestra área de interés (Freeman,
 946 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al., 2021). Para seleccionar un umbral de acumulación óptimo,
 947 consideramos cuatro criterios: consistencia con estudios similares, suficiente densidad de red, evitar una
 948 generalización excesiva de la red, y prevenir una red demasiado densa que incluya áreas sin características
 949 hidrológicas mínimas. Dado que nuestro DEM tiene una resolución espacial de 12.5 m, examinamos diferentes
 950 umbrales para obtener una red hidrográfica adecuada. En `r.stream.extract`, optamos por los umbrales de
 951 acumulación de 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas de superficie, respectivamente. Estos
 952 umbrales están en línea con los utilizados en estudios que consultamos, donde se evaluaron áreas propensas a
 953 inundaciones y cuencas de captación (Freeman, 1991; Marchesini et al., 2021).

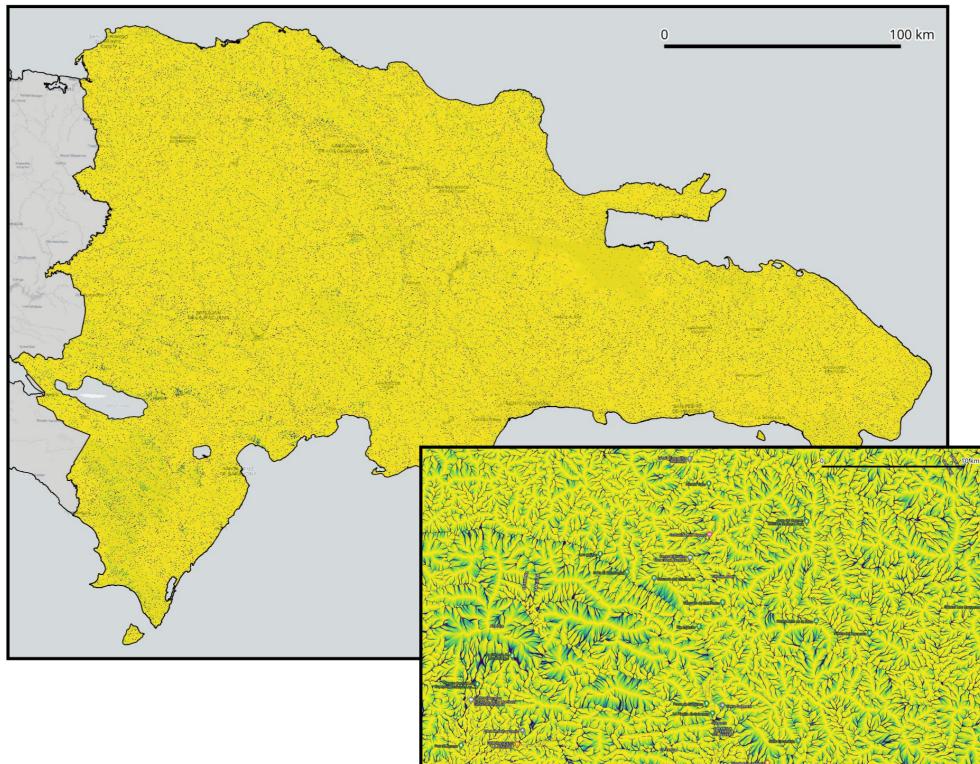


Figura S9: Mapa de acumulación de flujo generado con 'r.watershed'. En cartela, detalle del mapa en la cuenca del río Yaque del Sur.

954 El código necesario para generar las distintas redes evaluadas lo implementamos mediante un bucle **for** en
 955 Bash para mayor eficiencia y consistencia en el procesamiento. Hicimos que el bucle iterara automáticamente
 956 sobre los tres umbrales de acumulación, usando los valores de umbral como iterador (**i={180..900..360}**),
 957 debe leerse como “itera desde 180 a 900 en incrementos de 360 enteros”, resultando en los valores 180, 540 y
 958 900, el cual pasamos como argumento del parámetro **threshold**. Finalmente, para cada red generada con
 959 los distintos umbrales, calculamos la longitud de cursos fluviales, actualizamos la base de datos de GRASS
 960 GIS y generamos un archivo de texto resumen que posteriormente importamos a R para obtener estadísticos
 961 básicos.

```
# Extraer redes de drenaje para tres umbrales de acumulación distintos
# En bucle
for i in `echo {180..900..360}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i ..."; \
time r.stream.extract --overwrite elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
  depression=depresiones_todas threshold=$i \
  stream_vector=rstream_talwegs_umbral_$i stream_raster=rstream_talwegs_umbral_$i \
  direction=rstream_direccion_umbral_$i memory=32000; \
echo -e "r.stream.extract umbral $i finalizado" |\
  mail -s "Mensaje sobre r.stream.extract" USUARIO@MAIL; \
done
## real 11m28.455s
## real 11m26.908s
## real 11m30.074s
# Único umbral, para testing
# time r.stream.extract --overwrite elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
#   depression=depresiones_todas threshold=64 \
#   stream_vector=rstream_talwegs_umbral_64 stream_raster=rstream_talwegs_umbral_64 \
#   direction=rstream_direccion_umbral_64 memory=32000
```

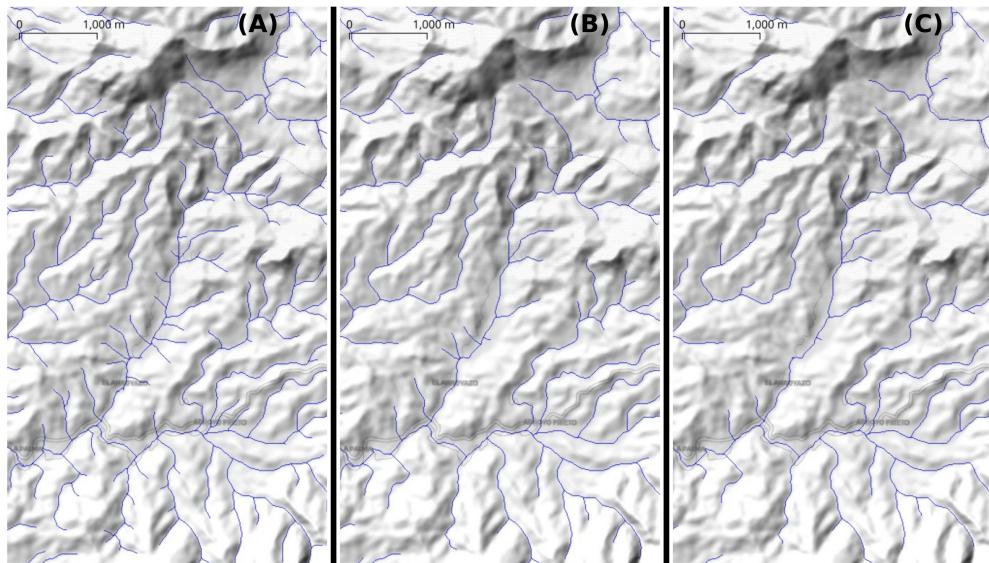


Figura S10: Red de drenaje extraída para tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. La imagen de fondo es un relieve sombreado a partir de DEM ALOS PALSAR, mostrando el área de El Arroyazo en la reserva científica Ébano Verde (provincia La Vega, cordillera Central de República Dominicana)

```
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real 11m46.930s
# Calcular estadísticos, y pasar a archivo
for i in `echo {180..900..360}`; \
do v.to.db -p option=length map=rstream_talwegs_umbral_$i > \
stats_length_rstream_talwegs_umbral_$i.txt;
done

stats_rstream_talwegs <- sapply(as.character(c(180, 540, 900)), function(x)
read_delim(paste0(dem_proc_dir, '/', 'stats_length_rstream_talwegs_umbral_', x, '.txt')),
progress = F, show_col_types = F), simplify = F)
n_rstream_talwegs <- stats_rstream_talwegs %>%
map(~ .x %>% filter(!cat==1) %>% nrow) %>% unlist
length_rstream_talwegs <- stats_rstream_talwegs %>%
map(~ .x %>% filter(!cat==1) %>% pull(length) %>% sum/1000) %>% unlist
```

962 Evaluamos los resultados y recopilamos los estadísticos esenciales de cada red formada con los distintos
963 umbrales. Para los umbrales de 180, 540 y 900 celdas, se obtuvieron **420010, 192566 y 130278 segmentos**
964 correspondientemente, acumulando **138476, 98203 y 82054 kilómetros** de longitud en cada caso (estos
965 valores excluyen una pequeña fracción del total fuera de la máscara). Para cada una de las redes, evaluamos el
966 grado de alineación con nuestros criterios de selección de la red óptima, tras lo cual elegimos la red generada
967 con el umbral de acumulación de 540 celdas. Sin embargo, mantuvimos las restantes en la base de datos y
968 les aplicamos todos los subsiguientes algoritmos de análisis de hidrología computacional, hasta alcanzar los
969 resultados finales.

970 Posteriormente, calculamos el orden jerárquico de la red hidrográfica, proceso que repetimos para cada uno
971 de los umbrales de acumulación que definimos previamente, es decir, 180, 540 y 900 celdas. Al igual que
972 en casos anteriores, utilizamos un bucle en Bash para iterar automáticamente sobre los tres umbrales de
973 acumulación; en este caso, los valores del índice se correspondían con los sufijos de los mapas de entrada (`_$i`).
974 El núcleo del bucle, en este caso, contiene la ejecución del complemento `r.stream.order` de GRASS GIS.
975 Este complemento se invoca con una serie de argumentos que especifican los mapas de entrada y salida que
976 se deben usar en el cálculo. De manera específica, le proporcionamos el mapa de `talwegs` o cursos (parámetro
977 `stream_rast`), el mapa de dirección de drenaje (`direction`), el mapa de elevación (`elevation`), y el mapa

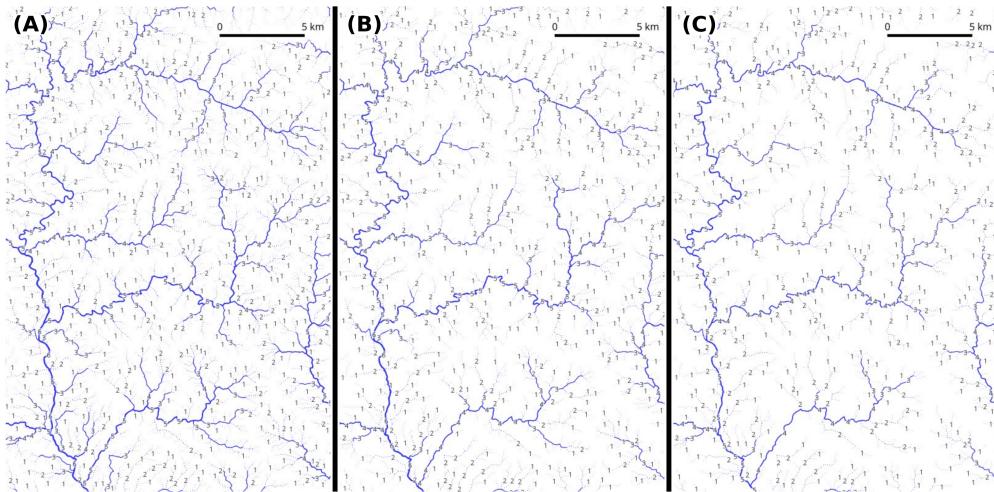


Figura S11: Orden de red de Strahler para redes de drenaje generadas a partir de tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. El área mostrada corresponde al río San Juan, afluente del río Yaque del Sur (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana)

978 de acumulación (**accumulation**), todos correspondientes al umbral de acumulación que está siendo procesado
 979 en cada iteración. Adicionalmente, especificamos los nombres de los mapas de salida que contienen el orden
 980 de red según los métodos de Strahler y Horton (argumentos **strahler** y **horton**) (Horton, 1945; Strahler,
 981 1957), así como el mapa de topología (**topo**) y el vectorial de salida (**stream_vect**).

```
# Extraer orden de red en bucle
for i in `echo {180..900..360}`; \
  do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i ..."; \
    time r.stream.order --overwrite stream_rast=rstream_talwegs_umbral_$i \
      direction=rstream_direccion_umbral_$i \
      elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
      stream_vect=rstream_orden_de_red_umbral_$i \
      strahler=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_$i \
      horton=rstream_orden_horton_de_red_umbral_$i \
      topo=topologia_orden_umbral_$i memory=32000; \
    echo -e "r.stream.order umbral de acumulación $i finalizado" |\
      mail -s "Mensaje sobre r.stream.order" USUARIO@MAIL; \
done
## real 1m34.983s
## real 1m18.662s
## real 1m14.986s
# Aplicación de algoritmo con un único umbral, sólo para pruebas
# time r.stream.order --overwrite \
#   stream_rast=rstream_talwegs direction=rstream_direccion \
#   elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum stream_vect=order.todos \
#   topo=topologia_orden memory=32000
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
```

982 Corregimos la topología con **v.clean**, pero sólo para la red generada con el umbral de acumulación de 540
 983 celdas. Eliminamos los cursos con longitud 0 metros y actualizamos la longitud de cada curso en el campo
 984 **length** usando el complemento **v.to.db**.

```
v.clean --overwrite layer=1 \
  input=rstream_orden_de_red_umbral_540 \
  output=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned \
  tool=rmline
```

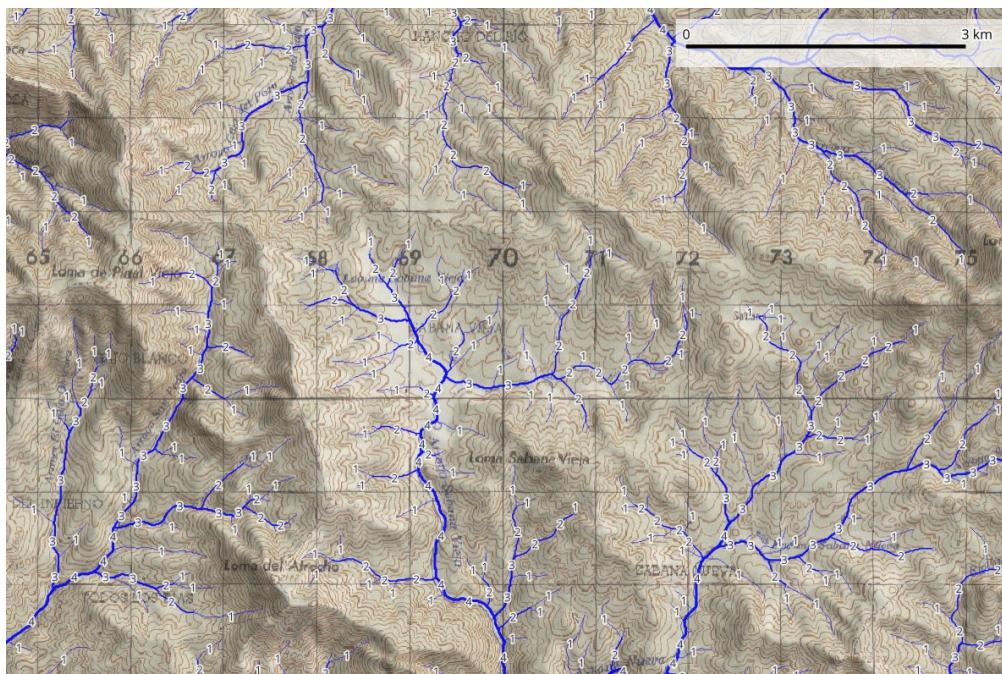


Figura S12: Orden de red de Strahler en el área del pico de la Viuda y Sabana Vieja, provincia San Juan (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana). Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 180 celdas, equivalente a 3 ha. De fondo, mapa topográfico nacional escala 1:50,000 y relieve sombreado

```
v.to.db --overwrite option=length type=line columns=area \
map=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned
```

985 Para completar la caracterización de las redes de drenaje, empleamos dos enfoques distintos: exploración visual
 986 y análisis estadístico. Para la exploración visual, usamos el mapa de la red y lo desplegamos en QGIS. Para la
 987 obtención de resultados analíticos, usamos el addon **r.stream.stats**, con el que calculamos los estadísticos
 988 de las redes jerarquizadas—longitud de tramos, área drenada, pendientes, razón de bifurcación—creadas con
 989 el addon **r.stream.order**. Mostramos a continuación las instrucciones necesarias para obtener los estadísticos
 990 mediante **r.stream.stats**. El archivo de texto resultante lo utilizamos en los análisis estadísticos posteriores
 991 en una sesión de R.

```
# Salida resumen
r.stream.stats --overwrite -o \
  stream_rast=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_540 \
  direction=rstream_direccion_umbral_540 \
  elevation=dem_pseudo_ortometrico \
  output=stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540_horton.txt \
  memory=32000
# Salida desagregada
r.stream.stats --overwrite \
  stream_rast=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_540 \
  direction=rstream_direccion_umbral_540 \
  elevation=dem_pseudo_ortometrico \
  output=stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt \
  memory=32000
```

992 A continuación, delimitamos cuencas y subcuencas según la jerarquía de red, con independencia de si tratara
 993 de cuencas tributarias o no, para lo cual usamos el complemento **r.stream.basins** especificando la opción
 994 (*flag*) **-c**, que utiliza una secuencia única de categorías (en nuestro caso, órdenes) para delimitar las cuencas
 995 en lugar de fluxos de entrada. En este caso, construimos un bucle **for** doble, anidando el orden de red dentro

996 del umbral de acumulación. Así, para cada uno de los mapas de redes hidrográficas según los tres umbrales
 997 de acumulación, delimitamos las cuencas de cada uno de los órdenes de Strahler disponibles. Al utilizar el
 998 criterio orden de red, las unidades delimitadas por este procedimiento incluyen tanto cuencas completas como
 999 subcuencas (tributarias), por lo que la mayoría contiene redes de drenaje tributarias (ríos que desembocan en
 1000 otros ríos).

```
# Delimitar cuencas según jerarquía
# En bucle
time for i in `echo {180..900..360}`; \
  do for j in `echo {1..8..1}`; \
    do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i, orden $j...\n"; \
      r.stream.basins -c --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$i \
        stream_rast=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_$i cats=$j \
        basins=rstream_cuencas_strahler_umbral_${i}_orden_$j memory=32000; \
      done; \
    echo -e "r.stream.basins umbral de acumulación $i finalizado" |\
      mail -s "Mensaje sobre r.stream.basins" USUARIO@MAIL; \
  done
## real 17m42.238s
```

1001 Posteriormente, delimitamos las cuencas con desembocadura en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas.
 1002 En esta sección aplicamos el mismo complemento que en el paso anterior (**r.stream.basins**) en bucle doble
 1003 anidado, pero en esta ocasión especificamos la opción **-1**. Es decir, delimitamos las cuencas completas, cuya
 1004 red desemboca en el mar (exorreicas), o en lagos, lagunas y pérdidas del karst (endorreicas), y excluimos las
 1005 subcuencas de redes tributarias (eg. red cuyo curso principal desemboca en otro río). Por lo tanto, se trata de
 1006 cuencas propiamente en la acepción más formal del término, que significa que no existe—o no se conoce ni se
 1007 puede detectar con información disponible—prolongación del drenaje superficial fuera de ellas.

```
# Delimitar cuencas terminales
# En bucle
time for i in `echo {180..900..360}`; \
  do for j in `echo {1..8..1}`; \
    do echo -e "\nTRABAJANDO EL UMBRAL DE ACUMULACIÓN $i, orden $j...\n"; \
      r.stream.basins -lc --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$i \
        stream_rast=rstream_orden_strahler_de_red_umbral_$i cats=$j \
        basins=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_${i}_orden_$j memory=32000; \
      done; \
    echo -e "r.stream.basins umbral de acumulación $i finalizado" |\
      mail -s "Mensaje sobre r.stream.basins" USUARIO@MAIL; \
  done
## real 16m16.808s
```

1008 Como último paso en la producción de resultados, convertimos las cuencas a modelo de datos vectorial,
 1009 pero para evitar agrandar la base de datos innecesariamente, elegimos sólo las cuencas generadas para el
 1010 umbral de 540 celdas. Los vectoriales resultantes nos permitieron un mejor manejo de los datos para análisis
 1011 y representación de la cuencas. Describimos el procedimiento detallado a continuación.

1012 Comenzamos la vectorización ejecutando un bucle para convertir cada capa ráster de cuencas terminales
 1013 correspondiente a cada orden de red (desde 1 a 8) en un mapa vectorial de tipo área. Para realizar esta
 1014 conversión, utilizamos el complemento **r.to.vect** de GRASS GIS, añadiendo también una nueva columna
 1015 llamada **strahler** a la tabla de atributos de cada capa vectorial, que luego actualizamos con el valor del orden
 1016 de red Strahler correspondiente. Después de procesar las cuencas de cada orden, fusionamos todas las capas
 1017 vectoriales en una sola utilizando el complemento **v.patch**. Esto produjo una única capa vectorial conteniendo
 1018 información sobre todas las cuencas terminales para todos los órdenes Strahler. Es importante aclarar que sólo
 1019 fueron propiamente clasificadas como polígonos con de orden de red, aquellas las áreas del ráster que contaban
 1020 con categorías asignadas (e.g. píxeles con valor 1 a 8), es decir, aquellas a las que el algoritmo **r.stream.basins**
 1021 asignó un orden de red debidamente. Las áreas que formaban el fondo (e.g. píxeles con valor cero), que
 1022 corresponden a espacios con drenaje hacia depresiones sin pertenencia a jerarquía alguna, conforman la capa
 1023 “0” del mapa vectorial generado (**rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned 0**).
 1024 Por esta razón, el mapa vectorial de cuencas generado, presenta espacios vacíos; si hiciera falta recuperar

1025 dichos espacios, bastaría con cargar la referida capa “0”, tomando en consideración que sus elementos no
 1026 cuentan con atributos aprovechables.

1027 Luego, limpiamos y preparamos los datos para el análisis. Primero, corregimos la topología y actualizamos el
 1028 área de cada cuenca usando el complemento `v.clean`. Eliminamos las áreas inferiores a 4000 m² (cuenca
 1029 espurias) para mejorar la calidad de los datos. Posteriormente, eliminamos los registros con un valor de área
 1030 nulo (artefactos). Estas etapas de limpieza y preparación son críticas para garantizar la precisión y relevancia
 1031 de nuestros resultados.

1032 Finalmente, seleccionamos las filas válidas—las que tenían un valor de categoría distinto de -1—de la tabla
 1033 de atributos de nuestra capa vectorial final, y exportamos estos datos a un archivo de texto. Este archivo de
 1034 texto contiene estadísticas del área para cada cuenca terminal según orden Strahler, lo cual nos proporcionó
 1035 información valiosa para nuestro análisis posterior.

```
# Cuenca y subcuenca según orden
time for i in `echo {1..8..1}`; \
  do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
    r.to.vect --overwrite input=rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i \
      output=rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i type=area; \
    v.db.addcolumn rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i \
      columns="strahler int"; \
    v.db.update rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i \
      col=strahler value=$i where="strahler IS NULL"; \
    # Calcular estadísticos, y pasar a archivo
    ## Preparación de fuentes (corrección de topología)
    ##                                     actualización de área >
    ##                                     eliminar registros
    v.clean --overwrite layer=1 \
      input=rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i \
      output=foo \
      tool=rmarea threshold=4000
    v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
      map=foo
    v.db.droprow --overwrite \
      input=foo \
      output=rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i where="area IS NULL"
    g.remove -f type=vector \
      name=foo
done
## real 19m7.443s

# Limpiando las cuencas de órdenes 2 y 3 de menos de 60,000 m2
for i in `echo {2..3..1}`; \
  do v.db.droprow --overwrite \
    input=rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i \
    output=foo \
    where="area <= 6e4";
    g.rename --overwrite \
      vector=foo,rstream_cuenca_strahler_umbral_540_orden_$i; \
    g.remove -f type=vector name=foo; \
done

# Cuenca terminal
time for i in `echo {1..8..1}`; \
  do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
    r.to.vect --overwrite input=rstream_cuenca_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
      output=rstream_cuenca_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i type=area; \
    v.db.addcolumn rstream_cuenca_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
```

```

    columns="strahler int"; \
v.db.update rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
    col=strahler value=$i where="strahler IS NULL"; \
done
# Tiempo estimado: 3m

# Unir cuencas terminales
v.patch -e --overwrite \
    input=g.list type=v pattern='rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_*' \
        separator=comma \
    output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos

# Corregir topología, excluir espurias, calcular estadísticos, y pasar a archivo
## Corrección de topología
v.clean --overwrite layer=1 input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos \
    output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    tool=rmarea threshold=4000
## Actualización de área
v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
    map=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar registros
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    output=foo where="area IS NULL"
## Renombrar mapa a original
g.rename --overwrite \
    vector=foo,rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar temporal
g.remove -f type=vector name=foo
## Excluir cuencas strahler>=4 y area<=1e6
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    output=foo \
    where="strahler >= 4 and area <= 1e6"
## Renombrar mapa a original
g.rename --overwrite \
    vector=foo,rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
## Eliminar temporal
g.remove -f type=vector name=foo
## Generar tabla
v.db.select --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    where='cat!= -1' > stats_area_rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos.txt

# Generar salidas GPKG y SHP para cuencas terminales
## Exportar el mapa 'rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
    input=rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned \
    output=gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.gpkg \
    type=line \
    format=GPKG
## Exportar el mapa 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned'
## a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
    input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    output=gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg \
    type=area \
    format=GPKG
## Exportar el mapa 'rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned' a Shapefile

```

```

## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
    gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.shp \
    gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned.gpkg
## Exportar el mapa 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned'
## a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
    gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.shp \
    gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg

# Generar salidas GPKG y SHP para cuencas y subcuencas
## Exportar mapas 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i' a GeoPackage
for i in `echo {1..8..1}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
v.out.ogr --overwrite \
    input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
    output=gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i.gpkg \
    type=area \
    format=GPKG
done

stats_rstream_cuencas_540 <- read_delim(
  paste0(dem_proc_dir, '/'),
  'stats_area_rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos.txt'),
  progress = F, show_col_types = F) %>%
  rename(`Orden de red (Strahler)` = strahler)
stats_rstream_cuencas_540_estadisticos <- stats_rstream_cuencas_540 %>%
  group_by(`Orden de red (Strahler)`) %>%
  summarise(`Número de cuencas` = n(),
            `Área promedio (km$^2$)` = mean(area),
            `Área promedio (km$^2$), error est.` = sd(area)/sqrt(length(area)),
            `Área total (km$^2$)` = sum(area))
rstream_cuencas_540_por_orden_tabla <- stats_rstream_cuencas_540_estadisticos %>%
  mutate_at(vars(starts_with("Área")), list(~./1000000)) %>%
  mutate(across(where(is.numeric), ~ signif(.x, digits = 4))) %>%
  mutate(`Área promedio (km$^2$) (error est.)` = paste0(
    `Área promedio (km$^2$)`, ' (',
    `Área promedio (km$^2$), error est.`,')')
  )) %>%
  select(-`Área promedio (km$^2$)`, -`Área promedio (km$^2$), error est.`) %>%
  adorn_totals(,,, matches('Número|total'))
rstream_cuencas_540_por_orden_p <- stats_rstream_cuencas_540_estadisticos %>%
  ggplot + aes(x = `Orden de red (Strahler)`, y = `Número de cuencas`) +
  geom_line() + ylab('Número de cuencas (log2)') +
  scale_y_continuous(trans='log2') +
  theme_bw() +
  theme(text = element_text(size = 18))

```

1036 5.1. Suplemento para la sección “Resultados”

1037 Realizamos análisis estadísticos de las cuencas terminales. Se necesita descargar el comprimido con los datos
 1038 del estudio, colocar el directorio `gpkg-shp` en el directorio raíz de este repo. Como medida de seguridad,
 1039 excluimos cuencas con orden de red cuatro o mayor y con área menor 1^2 . Posteriormente, generamos un
 1040 nuevo objeto de cuencas de orden cuatro o mayor para análisis focalizados, así como objetos de cuencas y
 1041 subcuencas de todos los órdenes, y obtuvimos estadísticos básicos (la asimetría y la curtosis son G_1 y G_2 ,
 1042 respectivamente, del trabajo de Joanes y Gill (1998)).

```

# Cuencas terminales
cuencas <- st_read(
  dsn = 'gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned.gpkg',
  quiet = T)
cuencas4mas <- cuencas[cuencas$strahler >= 4, ]
# Cuencas y subcuenas
cuencas_subcuenas <- sapply(as.character(1:8), function(x) {
  st_read(
    dsn = paste0('gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_', x, '.gpkg'),
    quiet = T
  ), USE.NAMES = T, simplify = F)
cuencas_sub_areas_ordenes <- map(cuencas_subcuenas,
  ~ .[['area']] %>% st_drop_geometry %>%
    pull(area) %>% as_tibble %>%
    mutate(`Área (kilómetros cuadrados)` = value/1e6,
          `Área (hectáreas)` = value/1e4) %>%
    rename(`Área (metros cuadrados)` = value)) %>%
  bind_rows(.id = 'Orden de red')
cuencas_sub_areas_ordenes_r <- cuencas_sub_areas_ordenes %>%
  group_by(`Orden de red`) %>%
  summarise(describe(`Área (kilómetros cuadrados)`, type = 2)) %>%
  select(-`vars`, -trimmed, -mad, -se) %>%
  select(`Orden de red`, `Número` = n, `Media (km${^2})` = mean,
         `Mediana (km${^2})` = median, `Desv. estándar (km${^2})` = sd,
         `Mínimo (km${^2})` = min, `Máximo (km${^2})` = max,
         `Rango (km${^2})` = range, Sesgo = skew,
         Curtosis = kurtosis)
cuencas_sub_areas_ordenes_p <- cuencas_sub_areas_ordenes %>%
  mutate(`tamaño` = scales::rescale(as.numeric(`Orden de red`), to = c(1, 10))) %>%
  ggplot +
  aes(x = `Orden de red`, y = `Área (kilómetros cuadrados)`) +
  geom_jitter(alpha = 0.2, height = 0, width = 0.05
              , aes(color = `Orden de red`, fill = `Orden de red`, size = `tamaño`))
  ) +
  geom_violin(alpha = 0.6, width = 0.8, color = "transparent", fill = "gray"
              , aes(color = `Orden de red`))
  ) +
  geom_boxplot(alpha = 0, width = 0.3, color = "#808080") +
  scale_y_continuous(trans = 'log2', labels = decimales_y_enteros) +
  scale_size_continuous(range = c(1,3)) +
  theme_bw() +
  theme(legend.position = 'none', text = element_text(size = 18))
png('figuras/cuencas-subcuenas-areas-ordenes-boxplot.png',
  width = 3500, height = 2400, res = 450)
cuencas_sub_areas_ordenes_p
invisible(dev.off())

```

- 1043 Obtuvimos los mapas de cuencas y subcuenas para cada orden con el paquete `tmap`. Primero, extrajimos
 1044 los límites del país hacia el directorio `gpkg-shp` para disponer de un contexto en los mapas generados a
 1045 continuación.

```

# Generar GPKG de país
v.out.ogr --overwrite \
  input=mascara \
  output=gpkg-shp/mascara.gpkg \
  type=area \
  format=GPKG

```

1046 Importamos la máscara, y generamos los campos necesarios para realizar el panel de mapas de las cuencas y
 1047 subcuencas de cada orden (8 mapas). Para ello, a partir de la lista de objetos `sf` conteniendo las cuencas y
 1048 subcuencas, generamos un objeto único y convertimos de metros a kilómetros cuadrados. Posteriormente,
 1049 generamos el objeto de panel de mapas con `tmap`.

```
# Máscara
mascara <- st_read('gpkg-shp/mascara.gpkg')

## Reading layer 'mascara' from data source
##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/mascara.gpkg'
##   using driver 'GPKG'
## Simple feature collection with 5 features and 17 fields
## Geometry type: POLYGON
## Dimension: XY
## Bounding box: xmin: 182215.8 ymin: 1941044 xmax: 571429.3 ymax: 2205216
## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N

# Objeto sf de las cuencas de todos los órdenes
cuencas_sub_areas_ordenes_sf <- map(cuencas_subcuencas, ~.[`area`]) %>%
  mutate(`Área (kilómetros cuadrados)` = area/1e6,
        `Área (hectáreas)` = area/1e4) %>%
  rename(`Área (metros cuadrados)` = area)) %>%
  bind_rows(.id = 'Orden de red')
# Objeto sf de los linderos de las cuencas, en objeto de tipo MULTILINESTRING
cuencas_sub_areas_ordenes_lines_sf <- cuencas_sub_areas_ordenes_sf %>%
  select(orden = `Orden de red`) %>%
  mutate(grosor = ifelse(orden %in% 1:3, 0, 0.1)) %>%
  mutate(orden = paste('Orden', orden)) %>%
  st_cast('MULTILINESTRING')
# Mapa en tmap
cuencas_sub_areas_ordenes_tm <- cuencas_sub_areas_ordenes_sf %>%
  select(orden = `Orden de red`, `km cuad.` = `Área (kilómetros cuadrados)`) %>%
  mutate(grosor = ifelse(orden %in% 1:2, 0.0001, 0.1)) %>%
  mutate(orden = paste('Orden', orden)) %>%
  tm_shape() +
  tm_fill(col='km cuad.', palette = "YlOrBr", style = 'quantile') +
  tm_facets(by = "orden", ncol = 2, nrow = 4, free.coords = FALSE, free.scales = TRUE) +
  tm_shape(cuencas_sub_areas_ordenes_lines_sf) +
  tm_lines(lwd = 'grosor', col = 'grey80', legend.lwd.show = F) +
  tm_facets(by = "orden", ncol = 2, nrow = 4, free.coords = FALSE, free.scales = TRUE) +
  tm_layout(panel.label.size = 2.5, legend.stack = "horizontal",
            legend.title.size = 2, legend.text.size = 1.5) +
  tm_shape(shp = mascara) +
  tm_borders(col = 'black', lwd = 0.8)
```

1058 El bloque de código a continuación no se reproduce durante el tejido, pues la exportación del mapa a formato
 1059 PNG consume varios minutos de cómputo, lo cual retardaría innecesariamente el tejido. Se recomienda
 1060 ejecutarlo manualmente cuando se necesite actualizar el panel de mapas de las cuencas y subcuencas según
 1061 órdenes generado por `tmap`.

```
# Mapa en PNG
tmap_save(
  tm = cuencas_sub_areas_ordenes_tm,
  filename = "figuras/cuencas-subcuencas-areas-ordenes.png",
  width = 3000, height = 4200, dpi = 200)
```

1062 Visualizamos la red a partir del archivo fuente correspondiente (nombre raíz
 1063 `rstream_orden_de_red_umbral_540_cleaned`), localizado en el directorio `gpkg-shp` del conjunto de
 1064 datos supplementarios (existen dos versiones idénticas en formatos GeoPackage y Shapefile). También
 1065 probamos con el mapa del mismo nombre desde la base de datos de GRASS GIS en QGIS, lo cual resultó ser

1066 más eficiente. Adicionalmente, cargamos los estadísticos hortonianos y desagregados de la red, generados con
 1067 el addon `r.stream.stats`, a la sesión de R, para posteriormente explorar patrones a escala nacional y según
 1068 órdenes de red.

```

redes_ord_nombres_columnas <- c(
  'Orden de red', 'Número de cursos', 'Longitud promedio (km)',
  'Área promedio (km$^2$)', 'Pendiente promedio, celda a celda (m/m)',
  'Gradiente promedio, nacimiento a desembocadura (m/m)',
  'Diferencia de elevación promedio (m)',
  'Longitud total (km)', 'Área total (km$^2$)'
)
# Horton
redes_ord_horton <- read.csv(
  file = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540_horton.txt',
  skip = 1, header = TRUE) %>%
  setNames(redes_ord_nombres_columnas)
# Razón de bifurcación a partir de promedio
redes_ord_horton_rb_prom <- with(
  data = redes_ord_horton,
  expr = mean(`Número de cursos`[-length(`Número de cursos`)])/
    `Número de cursos`[-1]))
# Razón de bifurcación a partir de coeficientes de regresión
redes_ord_horton_rb_regr <- 1/10^lm(log10(`Número de cursos`) ~ `Orden de red`,
  data = redes_ord_horton)$coefficients[[2]]
# Globales
redes_res <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 3, fin = 5, dos_filas = T) %>%
  setNames(c(
    'Orden máximo', 'Número total de cursos', 'Longitud total de cursos',
    'Área total (km$^2$)', 'Densidad de drenaje (km/km$^2$)', 'Frecuencia de cursos (num/km$^2$)')
  )
redes_res_dd <- redes_res$`Densidad de drenaje (km/km$^2$)`-
# Según órdenes: promedios de longitud, área,
# pendiente/gradiante y diferencia de elevación
redes_ord_long_area_pend_ele <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 16, fin = 25, dos_filas = T) %>%
  setNames(redes_ord_nombres_columnas[c(1,3:7)])
# Según órdenes: desviaciones estándar de longitud,
# área, pendiente/gradiante y diferencia de elevación
redes_ord_long_area_pend_ele_desv <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 27, fin = 36, dos_filas = T) %>%
  setNames(c(
    redes_ord_nombres_columnas[1],
    paste(redes_ord_nombres_columnas[c(3:7)], '($\\sigma$)'))))
# Según órdenes: totales de número de cursos, longitud y área
redes_ord_totales_num_long_area <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 38, fin = 47, dos_filas = F) %>%
  setNames(c(
    redes_ord_nombres_columnas[1:2],
    redes_ord_nombres_columnas[8:9]))
)
# Unir estadísticos según órdenes
redes_ord_final <- Reduce(function(x, y) merge(x, y, by = "Orden de red"),
  list(redes_ord_long_area_pend_ele,
    redes_ord_long_area_pend_ele_desv,
    redes_ord_totales_num_long_area))

```

```

        redes_ord_totales_num_long_area))

# Razones, cocientes, ratios (bifurcación, longitud, pendiente, densidad de drenaje, frecuencia)
redes_ord_razones <- extraer_rstream_stats(
  archivo = 'estadisticos/stats_rstream_order_strahler_red_umbral_540.txt',
  inicio = 48, fin = 57, dos_filas = F) %>%
  setNames(
    c(
      redes_ord_nombres_columnas[1],
      'Razón de bifurcación',
      paste('Razón de',
            tolower(
              gsub(' promedio| \\\(.*$|, celda.*$|, nacimiento.*$|', '',
                    redes_ord_nombres_columnas[3:6]))),
      'Densidad de drenaje (km/km$^2$)',
      'Frecuencia de cursos'
    )
  )
  asignar_valores_df_a_objetos(
    df = redes_ord_razones %>%
      select(matches('orden|bifurca|densidad')),
    nombre_dataset = 'razones',
    agrupar_por = 'Orden de red',
    forzar = T)

```

1069 A continuación, generamos tablas y gráficos relevantes de las variables de red.

```

# Primero calculamos los errores estándar de cada variable
redes_ord_final_con_ee <- redes_ord_final %>%
  inner_join(
    redes_ord_final %>%
      select(matches("Orden de red|Número de cursos|sigma")) %>%
      pivot_longer(
        cols = -c(`Número de cursos`, `Orden de red`),
        names_to = c("variable", ".value"),
        names_pattern = "(.*)" (\\\$\\\\\\\$sigma\\$\\\\))" %>%
        mutate(
          se = `\\$sigma` / sqrt(`Número de cursos`)) %>%
        pivot_wider(
          id_cols = c(`Orden de red`, `Número de cursos`),
          names_from = variable,
          values_from = se,
          names_glue = "{variable} (error est.)") %>%
        relocate(`Número de cursos`, `Longitud total (km)`,
                 `Área total (km$^2$)`, .after = 'Orden de red')
  # Luego generamos una tabla sólo con promedios y errores estándar
  redes_ord_final_promedios_ee <- redes_ord_final_con_ee %>%
    select(matches('Orden|Número|total|promedio|error est.'),
           -matches('sigma'))

# Generar objetos resumen para RMD
asignar_valores_df_a_objetos(
  df = redes_ord_final_promedios_ee %>%
    select(matches('orden|numero|promedio.*m\\$|promedio.*\\$\\$')), 
  nombre_dataset = 'redes_ord_final_promedios_ee',
  forzar = T)

```

1070 ## Sin agrupamiento especificado. Devolviendo resultados por filas

```

## Borrar objetos RR_* (sólo para uso interactivo)
# rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T))

# Finalmente una tabla resumen reorganizada
redes_ord_final_promedios_ee_r <- redes_ord_final_promedios_ee %>%
  select(matches('Orden|promedio|error est.')) %>%
  rename_with(.cols = matches('m\\$|2\\$\\$'), ~ paste0(., ' (promedio)')) %>%
  pivot_longer(
    cols = `Orden de red`,
    names_to = c(".value", "medida"),
    names_pattern = "(.*)" \\((.*)_\\$"
  ) %>%
  pivot_longer(
    cols = -c(`Orden de red`, `medida`),
    names_to = 'variable',
    values_to = 'valor') %>%
  pivot_wider(names_from = 'medida', values_from = 'valor') %>%
  mutate(`Orden de red` = as.factor(`Orden de red`))
# Tabla totales
redes_ord_final_totales_tabla <- redes_ord_final_promedios_ee %>%
  select(`Orden de red`, `Número de cursos`,
         `Longitud total (km)` %>%
    mutate(`Orden de red` = factor(`Orden de red`)) %>%
    adorn_totals()
redes_ord_final_totales_tabla_total_cursos <- with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Número de cursos`[`Orden de red` == "Total"])
redes_ord_final_totales_tabla_total_longitud <- with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Longitud total (km)`[`Orden de red` == "Total"])
redes_ord_final_totales_tabla_total_cursos_1a4 <- sum(with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Número de cursos`[`Orden de red` %in% 1:4]))
redes_ord_final_totales_tabla_total_longitud_1a4 <- sum(with(
  redes_ord_final_totales_tabla,
  `Longitud total (km)`[`Orden de red` %in% 1:4]))
redes_ord_final_totales_orden_max <- max(
  as.integer(redes_ord_final_promedios_ee$`Orden de red`))
# Tabla promedios
redes_ord_final_promedios_ee_r_tabla <- redes_ord_final_promedios_ee_r %>%
  mutate(`Promedio (error est.)` = paste0(
    signif(promedio, 2), ' (',
    signif(`error est.\`, 1), ')')) %>%
  select(-promedio, -`error est.\` %>%
  mutate(variable = gsub(
    ' promedio|, celda a celda|, nacimiento a desembocadura', ' ', variable)) %>%
  pivot_wider(
    names_from = 'variable',
    values_from = 'Promedio (error est.)')
# Gráfico
redes_ord_final_promedios_ee_r_p <- redes_ord_final_promedios_ee_r %>%
  mutate(variable = factor(
    x = variable,
    levels = c(
      "Longitud promedio (km)",
      "Área promedio (km$^2$)",
      "Pendiente promedio, celda a celda (m/m)",


```

```

    "Gradiente promedio, nacimiento a desembocadura (m/m)",
    "Diferencia de elevación promedio (m)"
),
labels = c(
  "Longitud~(km)",
  "Área~(km^2)",
  "atop('Pendiente', 'celda a celda (m/m)'),",
  "atop('Gradiente desde nacimiento', 'a desembocadura (m/m)'),",
  "Diferencia-de-elevación~(m)"
))) %>%
ggplot + aes(x=`Orden de red`, y = promedio) +
geom_errorbar(
  aes(ymin = promedio - `error est.` , ymax = promedio + `error est.`),
  colour = "grey30", width = .3) +
geom_point(size=2, shape=21, fill="white") +
facet_wrap(~ variable, scales = 'free_y', nrow = 1,
  labeller = label_parsed) +
ylab('valor') +
theme_bw()
png('figuras/variables-de-redes-segun-ordenes.png', width = 3000, height = 1000, res = 300)
redes_ord_final_promedios_ee_r_p
invisible(dev.off())

```

1071 También calculamos los cursos más largos de ríos dominicanos seleccionados con el complemento `r.accumulate`.
 1072 Como criterio de selección, elegimos ríos de orden seis o mayores, de forma general, pero también incluimos
 1073 otros de orden cinco y uno de orden cuatro, para garantizar mayor representatividad en el territorio
 1074 dominicano. De los ríos seleccionados, digitalizamos sus desembocaduras manualmente, observando el mapa
 1075 de dirección de flujo y la red extraída con `r.stream.extract`. Este paso nos permitió elegir un punto idóneo
 1076 de desembocadura, pues el algoritmo `r.accumulate` no admite puntos fuera de la red ni puntos sin flujo
 1077 dirigido. Este proceso podíamos hacerlo automáticamente, pero preferimos la edición manual, dado que nos
 1078 permitió recorrer la red íntegramente, y porque nos permitió elegir sitios de desembocadura personalizados
 1079 para asegurar extraer cursos representativos.

```

# Importar desembocaduras
v.import --overwrite input=desembocaduras-rios-grandes.gpkg \
  output=desembocaduras_rios_grandes
# Generar cursos más largos
time r.accumulate --overwrite \
  direction=rstream_direccion_umbral_540 \
  outlet=desembocaduras_rios_grandes \
  outlet_id_column=cat id_column=lfp_id \
  longest_flow_path=cursos_mas_largos
# real 0m33.792s
# Actualizar base de datos con la longitud de los cursos
v.to.db --overwrite option=length type=line columns=longitud \
  map=cursos_mas_largos
# Obtener los nombres de los cursos desde el mapa de desembocaduras
# mediante unión a través de los campos cat-lfp_id
v.db.join \
  map=cursos_mas_largos column=lfp_id \
  other_table=desembocaduras_rios_grandes other_column=cat subset_columns=nombre

# Generar salidas GPKG y SHP para cursos más largos y sus desembocaduras
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
  input=cursos_mas_largos \
  output=gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg \
  type=line \

```

```

format=GPKG
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
gpkg-shp/cursos_ = .shp \
gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg
## Exportar el mapa 'desembocaduras_rios_grandes' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
input=desembocaduras_rios_grandes \
output=gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.gpkg \
type=point \
format=GPKG
## Exportar el mapa 'cursos_mas_largos' a Shapefile
## Nota: algunos valores de área de objetos no se transfieren bien al formato SHP
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.shp \
gpkg-shp/desembocaduras_rios_grandes.gpkg

```

1080 Importamos los cursos más largos generados a R, eliminando a su vez los duplicados.

```

# Cursos más largos
cursos_mas_largos <- st_read(
  dsn = 'gpkg-shp/cursos_mas_largos.gpkg',
  quiet = T)
# Eliminar duplicados
cursos_mas_largos_sindup <- cursos_mas_largos[!duplicated(cursos_mas_largos$lfp_id),]

```

1081 A continuación, recuperamos los atributos de las cuencas a las que pertenecen los cursos más largos seleccionados. Para esto fue necesario quitar algunos nodos en las puntas de los cursos más largos con la función personalizada `quitar_puntas`, para asegurarnos de que los cursos se inscribían íntegramente en las cuencas.

```

# Crear una copia
cursos_mas_largos_sin_puntas <- cursos_mas_largos_sindup

# Recorremos cada línea en el objeto sf
for (i in seq_len(nrow(cursos_mas_largos_sin_puntas))) {
  # Extraer la linea actual
  linea_actual <- cursos_mas_largos_sin_puntas[i,]

  # Quitar los nodos
  linea_modificada <- quitar_puntas(st_geometry(linea_actual), n = 500)

  # Actualizar la linea en el objeto sf
  st_geometry(cursos_mas_largos_sin_puntas)[i] <- linea_modificada
}

```

1084 Posteriormente, realizamos la correspondiente unión espacial y generamos un objeto de cursos más largos completo, que incluye la información original y la de las cuencas en las que se inscriben. Exportamos a formato GeoPackage el objeto con información de cuencas.

```

# Unión espacial con cuencas para obtener sus atributos
cursos_mas_largos_sin_puntas_cuencas <- st_join(
  x = cursos_mas_largos_sin_puntas,
  y = cuencas4mas %>% select(-value, -label) %>% rename(id_cuenca = cat),
  join = st_covered_by)

# Objeto completo con datos de cuenca
cursos_mas_largos_completo <- cursos_mas_largos_sindup %>%
  inner_join(cursos_mas_largos_sin_puntas_cuencas %>% st_drop_geometry()) %>%

```

```

    mutate(`nombre_y_strahler` = paste0(nombre, ' (orden ', strahler, ')'))
  st_geometry(cursos_mas_largos_completo) <- 'geometry'
  st_write(
    obj = cursos_mas_largos_completo, delete_dsn = T,
    dsn = 'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg')

1087 ## Deleting source 'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg' using driver 'GPKG'
1088 ## Writing layer 'cursos_mas_largos_con_info_cuencas' to data source
1089 ##   'gpkg-shp/cursos_mas_largos_con_info_cuencas.gpkg' using driver 'GPKG'
1090 ## Writing 35 features with 8 fields and geometry type Line String.

# Generar mapa
cursos_mas_largos_completo_p <- cursos_mas_largos_completo %>%
  mutate(etiqueta = str_replace(nombre_y_strahler, "\\(o", "\n\\(o")) %>%
  mutate(etiqueta = str_replace(etiqueta, 'Macabónrito', 'Macaboncito')) %>%
  mutate(etiqueta = str_wrap(nombre_y_strahler, width = 15)) %>%
  ggplot + aes() +
  geom_sf(data = mascara, fill = 'transparent',
          color = 'grey50', lwd = 0.6) +
  geom_sf(color = 'blue', lwd = 0.6) +
  # ggslabel::geom_sf_label_repel(
  #   aes(label = etiqueta), fontface = 'bold', colour = 'grey30',
  #   size = 3, fill = alpha("white", 0.7), max.overlaps = 15,
  #   force = 50, seed = 60) +
  ggslabel::geom_sf_text_repel(
    aes(label = etiqueta), fontface = 'bold', colour = alpha('black', 0.7),
    size = 3, bg.colour = alpha("white", 0.3), bg.r = .2, max.overlaps = 15,
    force = 40, seed = 60) +
  theme_bw() +
  theme(plot.title = element_text(size = 11)) +
  ggspatial::annotation_scale(style = 'ticks')
png('figuras/cursos-mas-largos.png',
    width = 3500, height = 2400, res = 300)
cursos_mas_largos_completo_p
invisible(dev.off())
# Tabla
cursos_mas_largos_completo_tabla <- cursos_mas_largos_completo %>%
  st_drop_geometry() %>%
  arrange(desc(longitud)) %>%
  mutate(longitud = signif(longitud/1000, digits = 4)) %>%
  select(Nombre = nombre, `Longitud (km)` = longitud, `Orden máximo` = strahler)
# Generar objetos resumen para RMD
asignar_valores_df_a_objetos(
  df = cursos_mas_largos_completo_tabla,
  nombre_dataset = 'clargos',
  agrupar_por = 'Nombre', forzar = T)
## Borrar objetos RR_* (sólo para uso interactivo)
# rm(list = grep('RR_*', ls(), value = T))

```

1091 Informe de la sesión de R

```

sessionInfo()

1092 ## R version 4.3.0 (2023-04-21)
1093 ## Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)
1094 ## Running under: Ubuntu 20.04.3 LTS
1095 ##

```

```

1096 ## Matrix products: default
1097 ## BLAS: /usr/lib/x86_64-linux-gnublas/libblas.so.3.9.0
1098 ## LAPACK: /usr/lib/x86_64-linux-gnulapack/liblapack.so.3.9.0
1099 ##
1100 ## locale:
1101 ## [1] LC_CTYPE=es_DO.UTF-8      LC_NUMERIC=C
1102 ## [3] LC_TIME=es_DO.UTF-8       LC_COLLATE=es_DO.UTF-8
1103 ## [5] LC_MONETARY=es_DO.UTF-8   LC_MESSAGES=es_DO.UTF-8
1104 ## [7] LC_PAPER=es_DO.UTF-8     LC_NAME=C
1105 ## [9] LC_ADDRESS=C             LC_TELEPHONE=C
1106 ## [11] LC_MEASUREMENT=es_DO.UTF-8 LC_IDENTIFICATION=C
1107 ##
1108 ## time zone: America/Santo_Domingo
1109 ## tzcode source: system (glibc)
1110 ##
1111 ## attached base packages:
1112 ## [1] stats      graphics    grDevices utils      datasets  methods   base
1113 ##
1114 ## other attached packages:
1115 ## [1] spanish_0.4.2      ggsflabel_0.0.1    ggrepel_0.9.3
1116 ## [4] janitor_2.2.0      tmap_3.3-3        scales_1.2.1
1117 ## [7] e1071_1.7-13       gdalUtilities_1.2.4 lubridate_1.9.2
1118 ## [10] forcats_1.0.0      stringr_1.5.0    dplyr_1.1.2
1119 ## [13] purrrr_1.0.1       readr_2.1.4      tidyverse_2.0.0
1120 ## [16] tibble_3.2.1       ggplot2_3.4.2    tidyverse_2.0.0
1121 ## [19] kableExtra_1.3.4   sf_1.0-12       raster_3.6-20
1122 ## [22] sp_1.6-0          psych_2.3.3
1123 ##
1124 ## loaded via a namespace (and not attached):
1125 ## [1] DBI_1.1.3          mnormt_2.1.1     tmapproj_3.1-1   s2_1.1.4
1126 ## [5] conflicted_1.2.0   rlang_1.1.1      magrittr_2.0.3   snakecase_0.11.0
1127 ## [9] compiler_4.3.0     png_0.1-8       systemfonts_1.0.4 vctrs_0.6.2
1128 ## [13] rvest_1.0.3        crayon_1.5.2    pkgconfig_2.0.3  wk_0.7.3
1129 ## [17] fastmap_1.1.1     labeling_0.4.2   lwgeom_0.2-13   leafem_0.2.0
1130 ## [21] utf8_1.2.3        rmarkdown_2.21   tzdb_0.4.0      bit_4.0.5
1131 ## [25] xfun_0.39         cachem_1.0.8    jsonlite_1.8.4  terra_1.7-29
1132 ## [29] parallel_4.3.0    R6_2.5.1        stringi_1.7.12  RColorBrewer_1.1-3
1133 ## [33] reticulate_1.30   stars_0.6-2     Rcpp_1.0.10     knitr_1.42
1134 ## [37] base64enc_0.1-3   Matrix_1.6-1    timechange_0.2.0 tidyselect_1.2.0
1135 ## [41] rstudioapi_0.14   dichromat_2.0-0.1 abind_1.4-5    yaml_2.3.7
1136 ## [45] codetools_0.2-18  lattice_0.20-45 leafsync_0.1.0  withr_2.5.0
1137 ## [49] evaluate_0.21    units_0.8-2     proxy_0.4-27   xml2_1.3.4
1138 ## [53] pillar_1.9.0     KernSmooth_2.23-20 rticles_0.25   generics_0.1.3
1139 ## [57] vroom_1.6.3      hms_1.1.3       munsell_0.5.0  class_7.3-20
1140 ## [61] glue_1.6.2       tools_4.3.0     webshot_0.5.4  XML_3.99-0.14
1141 ## [65] grid_4.3.0      crosstalk_1.2.0 colorspace_2.1-0 nlme_3.1-155
1142 ## [69] ggspatial_1.1.8  cli_3.6.1      fansi_1.0.4    viridisLite_0.4.2
1143 ## [73] svglite_2.1.1    gtable_0.3.3   digest_0.6.31  classInt_0.4-9
1144 ## [77] farver_2.1.1    htmlwidgets_1.6.2 memoise_2.0.1   htmltools_0.5.5
1145 ## [81] lifecycle_1.0.3   leaflet_2.1.2   httr_1.4.6    bit64_4.0.5

```

1146 Referencias

- 1147 Anderson, R. S. y Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*.
 1148 Cambridge University Press.
- 1149 ASF DAAC. (2014). *PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>

- 1151 Aziz, K. M. A. y Rashwan, K. S. (2022). Comparison of different resolutions of six free online DEMs with
 1152 GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1585.
 1153 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10845-5>
- 1154 Barreto, S. B., Knowles, L. L., Mascarenhas, R., Affonso, P. R. A. de M. y Batalha-Filho, H. (2022). Drainage
 1155 rearrangements and in situ diversification of an endemic freshwater fish genus from north-eastern Brazilian
 1156 rivers. *Freshwater Biology*, 67(5), 759-773. <https://doi.org/10.1111/fwb.13879>
- 1157 Bishop, P. (1995). Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical
 1158 Geography: Earth and Environment*, 19(4), 449-473. <https://doi.org/10.1177/030913339501900402>
- 1159 Burn, D. H. (1997). Hydrological information for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*,
 1160 42(4), 481-492. <https://doi.org/10.1080/02626669709492048>
- 1161 Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.
- 1162 CIDIAT y INDRHI. (1992). *Control de Inundaciones en la cuenca del Río Yaque del Sur*. Instituto Nacional
 1163 de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1164 Culler, R. C., Hadley, R. F. y Schumm, S. A. (1961). *Hydrology of the upper Cheyenne River basin: Part
 1165 A. Hydrology of stock-water reservoirs in upper Cheyenne River basin; Part B. Sediment sources and
 1166 drainage-basin characteristics in upper Cheyenne River basin*. <https://doi.org/10.3133/wsp1531>
- 1167 Dal Pai, M. O., Salgado, A. A. R., Sordi, M. V. de, Carvalho Junior, O. A. de y Paula, E. V. de.
 1168 (2023). Comparing morphological investigation with χ index and Gilbert metrics for analysis of drai-
 1169 nage rearrangement and divide migration in inland plateaus. *Geomorphology*, 423, 108554. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108554>
- 1171 Ehlschlaeger, C. R. (1989). *Using the A[^]T search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation
 1172 data*. 275281.
- 1173 Forte, A. M. y Whipple, K. X. (2018). Criteria and tools for determining drainage divide stability. *Earth and
 1174 Planetary Science Letters*, 493, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026>
- 1175 Foucault, A. y Raoult, J. F. (1985). *Diccionario de Geología*. MASSON. <https://books.google.com.do/books?id=x5FDPQAACAAJ>
- 1177 Freeman, T. G. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers &
 1178 Geosciences*, 17(3), 413-422. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-I](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-I)
- 1179 GADM. (2022). *GADM*. Available online: <https://gadm.org/index.html> (accessed on abril, 2023).
- 1180 García, J. H. G. y Ojeda, A. O. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas
 1181 de información geográfica (SIG). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373-396.
- 1182 GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source
 1183 Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- 1184 Google; Airbus, CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey. (2023).
 1185 *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/>
- 1186 GRASS Development Team. (2022a). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 1187 Version 8.0.2*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 1188 GRASS Development Team. (2022b). *r.carve*. Generates stream channels. Takes vector stream data, transforms
 1189 it to raster and subtracts depth from the output DEM. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.carve.html>
- 1191 GRASS Development Team. (2022c). *r.mapcalc* - Raster map calculator. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>
- 1193 GRASS Development Team. (2022d). *r.watershed* - Calculates hydrological parameters and RUSLE factors.
 1194 <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.watershed.html>
- 1195 GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software,
 1196 Version 8.2.0*. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 1197 Gutiérrez Elorza, M. (2009). *Geomorfología* (Última reimpr). Pearson-Prentice Hall.
- 1198 Halcrow-COR Ing. S.A. (2002). *Estudio de Vulnerabilidad de las Grandes Presas*. Instituto Nacional de
 1199 Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1200 Harkins, N., Kirby, E., Heimsath, A., Robinson, R. y Reiser, U. (2007). Transient fluvial incision in the
 1201 headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China. *Journal of Geophysical Research*, 112(F3),
 1202 F03S04. <https://doi.org/10.1029/2006JF000570>
- 1203 Hernández Huerta, P. P. y Andrés, P.-E. (2002). Estructura del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Peralta,
 1204 República Dominicana. *Acta geológica hispánica*, 37(2), 183-205. <https://raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/view/75740>
- 1206 Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- 1208 Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An
 1209 empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4), 327-334. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405>

- 1210 Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350.
 1211 <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- 1212 Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach
 1213 to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56%5B275:EDOSAT%5D2.0.CO;2)
- 1214 INDRHI. (1996). *Estadísticas del Agua en la República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 1215 (INDRHI).
- 1216 INDRHI. (2012). *Plan Hidrológico Nacional, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
 1217 (INDRHI).
- 1218 INDRHI. (2019). *Inventario de Estaciones Hidrometeorológicas. Informe Final*. Instituto Nacional de Recursos
 1219 Hidráulicos.
- 1220 INDRHI y AQUATER. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase I. Memoria
 1221 de Proyecto, 7 volúmenes*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1222 INDRHI y EPTISA. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase II*. Instituto
 1223 Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 1224 Instituto Cartográfico Militar (ICM). (1989). *Serie E733 de mapas topográficos escala 1:50,000*. Instituto
 1225 Cartográfico Militar.
- 1226 Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los
 1227 Tres Picos Más Altos De Las Antillas*. Disponible en línea. Accedido a través de <https://www.ign.gob.do/index.php/noticias/item/448-medicion-por-sistema-global-de-navegacion-por-satelite-gnss-de-los-tres-picosp-mas-altos-de-las-antillas>.
- 1228 Izzo, M., Rosskopf, C. M., Aucelli, P. P. C., Maratea, A., Méndez, R. E., Pérez, C. y Segura, H. (2010). A New
 1229 Climatic Map of the Dominican Republic Based on the Thornthwaite Classification. *Physical Geography*,
 1230 31, 455-472.
- 1231 Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available
 1232 from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>), 15(25-54), 5.
- 1233 Jasiewicz, J. y Metz, M. (2011). A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks.
 1234 *Computers & Geosciences*, 37(8), 1162-1173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.003>
- 1235 Jasiewicz, J. y Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and
 1236 mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- 1237 JAXA/METI y ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res. Includes
 1238 material de JAXA/METI 2010*. Disponible en línea. Accedido a través de ASF DAAC <https://asf.alaska.edu/>. DOI: <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA> (accessed on abril, 2023).
- 1239 Joanes, D. N. y Gill, C. A. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the
 1240 Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(1), 183-189. <https://doi.org/10.1111/1467-9884.00122>
- 1241 Larson, M., Shapiro, M. y Tweddle, S. (1991). Performing map calculations on GRASS data: r.mapcalc pro-
 1242 gram tutorial. *US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory*. https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf.
- 1243 Le, T. D. N. (2019). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types
 1244 of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25,
 1245 739-761.
- 1246 Lenderking, H. L., Robinson, S. y Carlson, G. R. (2020). Climate change and food security in Caribbean small
 1247 island developing states: challenges and strategies. *International Journal of Sustainable Development &
 1248 World Ecology*, 28, 238-245.
- 1249 Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning
 1250 Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- 1251 Lindsay, J. B. (2018). *WhiteboxTools user manual*. Available online: https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html (accessed on abril, 2023).
- 1252 Lindsay, J. B., Francioni, A. y Cockburn, J. M. H. (2019). LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of
 1253 Drainage Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1926. <https://doi.org/10.3390/rs11161926>
- 1254 Lohmann, H. (2016). Comparing vulnerability and adaptive capacity to climate change in individuals of
 1255 coastal Dominican Republic. *Ocean & Coastal Management*, 132, 111-119.
- 1256 Mackay, E. A. y Spencer, A. J. (2017). The future of Caribbean tourism: competition and climate change
 1257 implications. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 9, 44-59.
- 1258 Maneerat, P. y Bürgmann, R. (2022). Geomorphic expressions of active tectonics across the Indo-Burma Range.
 1259 *Journal of Asian Earth Sciences*, 223, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.105008>

- 1268 Marchesini, I., Salvati, P., Rossi, M., Donnini, M., Sterlacchini, S. y Guzzetti, F. (2021). Data-driven flood
 1269 hazard zonation of Italy. *Journal of Environmental Management*, 294, 112986. <https://doi.org/10.1011/j.jenvman.2021.112986>
- 1270 Martinez-Batlle, J.-R. (2019). *Drainage rearrangement as a driver of geomorphological evolution during the
 1271 Upper Pleistocene in a small tropical basin*. <https://doi.org/10.31223/OSF.IO/PFZVQ>
- 1272 Martinez-Batlle, J. R. (2012). *Sierra de Bahoruco Occidental, República Dominicana: estudio biogeomorfológico
 1273 y estado de conservación de su parque nacional* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla; Available online:
 1274 <http://hdl.handle.net/11441/15199> (accedido en Julio, 2023)]. <http://hdl.handle.net/11441/15199>
- 1275 Martínez-Batlle, J.-R. (2019b). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During
 1276 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>
- 1277 Martínez-Batlle, J.-R. (2019a). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During
 1278 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>
- 1279 Martínez-Batlle, J.-R. (2023). *geofis/red-hidrografica-densa-rd: Repositorio de código del estudio 'Generación
 1280 de red hidrográfica densa de República Dominicana a partir de modelo digital de elevaciones de resolución
 1281 media'* (Versión v0.9) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8370346>
- 1282 Martínez-Batlle, J.-R. y Izzo-Gioiosa, M. (2023). *Datos del estudio "Generación de red hidrográfica densa de
 1283 República Dominicana a partir de modelo digital de elevaciones de resolución media"*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8365294>
- 1284 McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. y Meyer, L. D. (1987). Revised Slope Steepness
 1285 Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- 1286 Metz, M., Mitasova, H. y Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive,
 1287 radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2),
 1288 667-678. <https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011>
- 1289 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of
 1290 Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- 1291 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of
 1292 Hydrology*, 380(3-4), 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
- 1293 Mollat, H., Wagner, B. M., Cepek, P. y Weiss, W. (2004). *Mapa Geológico de la República Dominicana
 1294 1 : 250.000. Texto Explicativo*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- 1295 Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological,
 1296 geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- 1297 Musher, L. J., Giakoumis, M., Albert, J., Del-Rio, G., Rego, M., Thom, G., Aleixo, A., Ribas, C. C., Brumfield,
 1298 R. T., Smith, B. T. y Cracraft, J. (2022). River network rearrangements promote speciation in lowland
 1299 Amazonian birds. *Science Advances*, 8(14), eabn1099. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn1099>
- 1300 NASA JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second* [Data set]. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>
- 1301 NASA LP DAAC. (2000). *SRTM 1 Arc-Second Global*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- 1302 National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey. (2009). *ASTER GDEM*.
 1303 <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- 1304 Ngula Niipele, J. y Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in
 1305 semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57-67.
 1306 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- 1307 O'Brien, J. (2023). *gdalUtilities: Wrappers for 'GDAL' Utilities Executables*. <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtilities>
- 1308 OCHA. (2022). *Humanitarian Data Exchange (OCHA)*. Available online: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-dom> (accessed on abril, 2023).
- 1309 OEA y INDRHI. (1994). *Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hídricos (PNORHI)*. Instituto
 1310 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1311 Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2018). *División territorial de República Dominicana*. Available online:
 1312 <https://www.one.gob.do/media/s5gd100n/divisi%C3%B3n-territorial-2020-t.pdf> (accessed on
 1313 abril, 2023).
- 1314 OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org* . Available online:
 1315 <https://www.openstreetmap.org> (accessed on abril, 2023).

- 1326 Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*,
 1327 10(1), 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- 1328 Pebesma, E. y Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R* (p. 352). Chapman and
 1329 Hall/CRC. <https://r-spatial.org/book/>
- 1330 Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- 1331 Pereira de Oliveira, G., Carlos de Barros Corrêa, A., Azevedo Cavalcanti Tavares, B. de y Araujo Monteiro,
 1332 K. de. (2023). The influence of cenozoic magmatism on drainage rearrangement processes of the northeast
 1333 sector of the Borborema Highlands, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 121,
 1334 104124. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104124>
- 1335 Pérez Estaún, A., Hernáiz Huerta, P. P., Lopera Caballero, E., Joubert, M., Contreras, F., Escuder Viruete,
 1336 J., Díaz de Neira, J. A., Monthel, J., García Senz, J., Urien, P., et al. (2007). Geología de la República
 1337 Dominicana: de la construcción de arcos-isla a la colisión arco-continente. *Boletín geológico y minero*,
 1338 118(2), 157-173.
- 1339 Petrasova, A., Petras, V., Jeziorska, J., White, C. H. C., Reckling, W., Millar, G., Grokhowsky, N., Paulukonis,
 1340 A., Montgomery, K., Coffer, M., Harmon, B., Cepero, K., Starek, M., Hardin, N. L. E., Paris, P., Russ, E.,
 1341 Weaver, K., Fogelman, B., Leo, M. di y Stopkova, E. (2011). *GeoInformation Science and Environmental
 1342 Modeling*. <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/>
- 1343 QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System, Version 3.26.2*. QGIS Association.
 1344 <https://www.qgis.org>
- 1345 Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. y Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for
 1346 distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79.
 1347 <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- 1348 R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical
 1349 Computing. <https://www.R-project.org/>
- 1350 Rodríguez, H. y Febrillet, J. F. (2006). Potencial hidrogeológico de la República Dominicana. *Boletín Geológico
 1351 y Minero*, 117.
- 1352 Roson, R. (2013). A Modeling Framework to Assess the Economic Impact of Climate Change in the Caribbean.
 1353 *Cepal Review*, 111, 23-36.
- 1354 Saunders, W. (2000). Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. *Hydrologic and
 1355 Hydraulic Modeling Support. Redlands, CA: ESRI*, 2951.
- 1356 Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Atlas de los Recursos Naturales de la
 1357 República Dominicana*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 1358 SERCITEC y INDRHI. (2002). *Control de Inundaciones de la cuenca del Río Yaque del Norte*. Instituto
 1359 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1360 Shapiro, M. y Westervelt, J. (1994). *r.mapcalc: An algebra for GIS and image processing*. US Army Corps of
 1361 Engineers, Construction Engineering Research Laboratories.
- 1362 Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American
 1363 Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- 1364 Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, 84(6), 1-39. <https://doi.org/10.18637/jss.v084.i06>
- 1365 Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- 1366 Weltz, M. A., Renard, K. G. y Simanton, J. R. (1988). Revised Universal Soil Loss Equation for Western
 1367 Rangelands^1. *Estrategias de Clasificación Y Manejo de Vegetación Silvestre Para la Producción de
 1368 Alimentos en Zonas Áridas*, 150, 104.
- 1369 Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A.,
 1370 Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson,
 1371 D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source
 1372 Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- 1373 Xie, Y. (2014). knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. En V. Stodden, F. Leisch, y R.
 1374 D. Peng (Eds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman; Hall/CRC.
- 1375 Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and knitr* (2nd ed.). Chapman; Hall/CRC. <https://yihui.org/knitr/>
- 1376 Xie, Y. (2023). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. <https://yihui.org/g/knitr/>
- 1377 Zhu, H. (2021). *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax*. <https://CRAN.R-project.org/package=kableExtra>