

---

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

---

PREPUBLICACIÓN - PREPRINT

**José-Ramón Martínez-Batlle<sup>ID</sup>**

Facultad de Ciencias

Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)  
Santo Domingo, República Dominicana  
joseramon@geografiafisica.org

**Michela Izzo Gioiosa<sup>ID</sup>**

Directora Ejecutiva

Guakia Ambiente

Santo Domingo, República Dominicana  
michela.izzo@guakiambiente.org

30 de julio de 2023

## Resumen

<sup>1</sup> El resumen se colocará aquí.

<sup>2</sup> **Keywords** modelo digital de elevaciones · análisis hidrológico · procesamiento de datos geoespaciales ·  
<sup>3</sup> hidrología computacional

## <sup>4</sup> 1. Introducción

<sup>5</sup> El agua es un recurso crítico, que impulsa la economía y sostiene la vida. A nivel global, pero especialmente  
<sup>6</sup> en países que comparten islas pequeñas, como República Dominicana (RD), la administración eficaz de este  
<sup>7</sup> recurso es esencial (Izzo et al., 2010; Le, 2019; Lenderking et al., 2020; Lohmann, 2016; Mackay y Spencer,  
<sup>8</sup> 2017; Roson, 2013). Sin embargo, la gestión eficiente de los recursos hídricos puede verse limitada por la  
<sup>9</sup> falta de información precisa y completa sobre la red hidrográfica. En este contexto, las fuentes actuales de  
<sup>10</sup> información geográfica, a pesar de su valor, presentan limitaciones en cuanto a su resolución, cobertura y  
<sup>11</sup> consistencia.

<sup>12</sup> La red hidrográfica de RD digitalizada a partir del mapa topográfico nacional a escala 1:50,000 (“MTN-50k”)  
<sup>13</sup> (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989) ofrece una cobertura extensa pero carece de los detalles necesarios  
<sup>14</sup> para apoyar el análisis hidrológico. Por otro lado, los estudios técnicos y multitemáticos de ámbito subnacional  
<sup>15</sup> desarrollados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) de RD y otras entidades y autores,  
<sup>16</sup> aunque son valiosas fuentes de información, utilizan metodologías diversas, lo que limita la consolidación  
<sup>17</sup> de una red hidrográfica coherente a nivel nacional (CIDIAT y INDRHI, 1992; Halcrow-COR Ing. S.A.,  
<sup>18</sup> 2002; INDRHI, 1996, 2012; INDRHI y AQUATER, 2000; INDRHI y EPTISA, 2000; Martínez-Batlle, 2019;  
<sup>19</sup> Martínez-Batlle, 2019; OEA y INDRHI, 1994; Rodríguez y Febrillet, 2006; Secretaría de Estado de Medio  
<sup>20</sup> Ambiente y Recursos Naturales, 2004; SERCITEC y INDRHI, 2002)

<sup>21</sup> Adicionalmente, las redes hidrográficas derivadas de modelos digitales de elevaciones de baja resolución, como  
<sup>22</sup> el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 3 arco-segundos, normalmente presentan artefactos de  
<sup>23</sup> difícil depuración, además de que la longitud de los canales es siempre más corta que la verdadera, resultando  
<sup>24</sup> en redes poco densas (Jarvis et al., 2008; NASA JPL, 2013; NASA LP DAAC, 2000; National Aeronautics  
<sup>25</sup> and Space Administration y United States Geological Survey, 2009). Por otro lado, el DEM SRTM de 1  
<sup>26</sup> arco-segundo (~30 metros) garantiza la precisión mientras aumenta el detalle de elevación y parece ser una de  
<sup>27</sup> las fuentes más consistentes actualmente (Aziz y Rashwan, 2022). No obstante, nosotros hemos generado  
<sup>28</sup> productos hidrográficos con SRTM-DEM de 30 metros, y notamos que el nivel de detalle de la red es bastante  
<sup>29</sup> mejorable, sobre todo en áreas de montaña.

30 Desde 2014, Alaska Satellite Facility (ASF) inició la creación de productos ALOS-PALSAR corregidos  
 31 radiométricamente en función del terreno (RTC), con el objetivo de mejorar la geometría y la radiometría—  
 32 coeficiente de retrodispersión por unidad de superficie del frente de onda incidente, también conocido como  
 33 *gamma-nought*,  $\gamma^0$ —de las imágenes generadas por el sensor PALSAR (radar de apertura sintética, banda L,  
 34 con distintas polarizaciones y modos de barrido) montado a bordo del satélite ALOS de la Agencia Espacial  
 35 Japonesa (JAXA) (ASF DAAC, 2014; JAXA/METI y ASF DAAC, 2015). ALOS fue lanzado en 2006, pero  
 36 luego de cinco años de servicio, perdió energía y cesó la comunicación con el centro de control, aunque aún  
 37 permanece en órbita.

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

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

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

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

## 79 Notas sobre terminología

80 La terminología utilizada para describir los distintos componentes de los sistemas fluviales es un tema de  
 81 continuo debate en el campo de la geomorfología fluvial. Este debate suele estar intrínsecamente ligado a la  
 82 escala de análisis empleada; al variar la escala, incrementándola o reduciéndola, los criterios empleados para  
 83 delimitar las definiciones de los elementos morfológicos, tienden a desdibujarse y/o a resultar inconsistentes  
 84 (García y Ojeda, 2011). Seleccionar el término apropiado para describir la unidad topográficamente deprimida

- 85 por donde fluye o por donde podría circular el agua de escorrentía, es un desafío nada despreciable. Este  
 86 reto se intensifica cuando el idioma introduce distintas connotaciones para términos similares, y donde  
 87 la traducción podría prestarse a confusión—tal como ocurre con *channel* y canal en inglés y español,  
 88 respectivamente—(Anderson y Anderson, 2010; Charlton, 2010; Gutiérrez Elorza, 2009; Pedraza Gilsanz,  
 89 1996).
- 90 La resolución de las discrepancias en la terminología supera el alcance del presente trabajo, por lo decidimos  
 91 fijar los términos utilizados en el artículo de manera convencional. En este estudio, empleamos los términos  
 92 *talweg* y canal de forma indistinta para referirnos a la unidad topográficamente deprimida por la que fluye,  
 93 o podría fluir, la corriente. En geomorfología, utilizamos la voz germánica *talweg* para referirnos a la línea  
 94 imaginaria que traza la parte más baja de un valle, razón por la cual también la hemos incluido entre  
 95 los términos genéricos usados (Foucault y Raoult, 1985). Es importante remarcar que nuestra definición  
 96 convencional no siempre se refiere a un curso fluvial permanente, pues la circulación del agua es influenciada  
 97 por múltiples factores. Asimismo, cabe destacar que, a esta unidad geomorfológica en sus distintas variantes  
 98 hidrodinámicas y dimensionales, también se le conoce con múltiples nombres en República Dominicana  
 99 (en orden de mayor a menor “importancia”), como son río, arroyo o cañada, denominaciones que también  
 100 incorporamos en la redacción.
- 101 Finalmente, en nuestro en este trabajo también adoptamos los términos curso, drenaje o corriente, espe-  
 102 cialmente cuando destacamos la presencia de un flujo ya sea permanente, semipermanente o intermitente.  
 103 Además, para el análisis hortoniano de los sistemas fluviales, nos referimos al sistema interconectado de  
 104 canales, cursos, corrientes o drenajes con las denominaciones “red de drenajes” o “red hidrográfica”.

## 105 2. Materiales y métodos

### 106 2.1. Obtención y Preprocesamiento del DEM

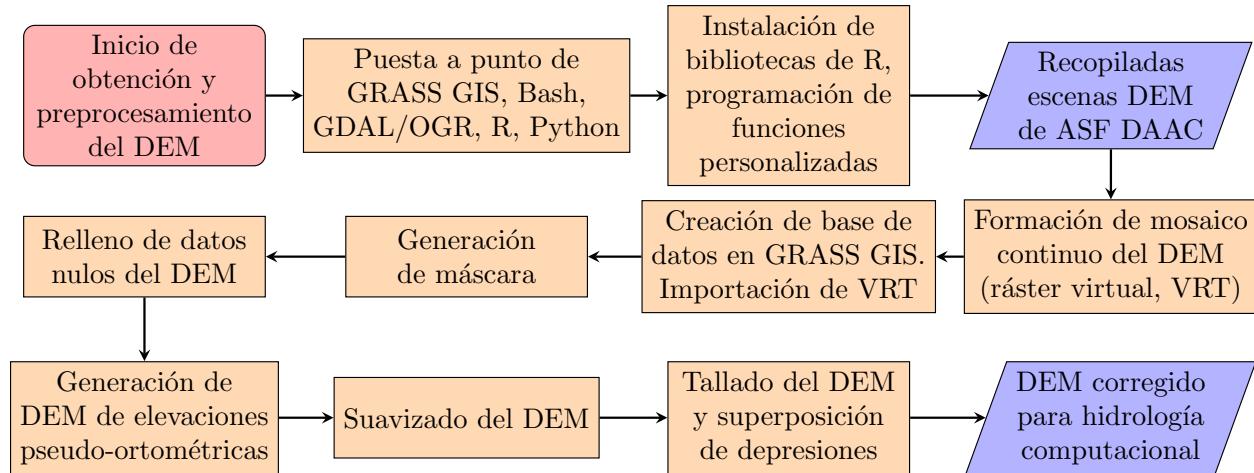


Figura 1: Resumen gráfico de la obtención y preprocesamiento del DEM

- 107 Iniciamos nuestro estudio valorando diversas herramientas para el procesamiento de los datos (Figura  
 108 1). Debido a la gran variedad de complementos que ofrece, junto con su alto rendimiento y la calidad  
 109 de los resultados que proporciona, decidimos utilizar GRASS GIS v8.2.0 para realizar la mayor parte  
 110 del preprocesamiento del DEM (GRASS Development Team, 2023). La implementación de su interfaz de  
 111 línea de comandos (e.g. interfaz basada en texto), en nuestro caso Bash, garantizó la reproducibilidad de  
 112 nuestros procedimientos. Nos auxiliamos también de la biblioteca GDAL/OGR, WhiteboxTools el entorno de  
 113 programación estadística R y el lenguaje de programación Python (GDAL/OGR contributors, 2022; Lindsay,  
 114 2018; R Core Team, 2023; Van Rossum y Drake, 2009). Nuestro enfoque de reproducibilidad asegura que, sin  
 115 importar la fuente de datos empleada, el seguimiento del flujo de trabajo es viable, manteniendo la integridad  
 116 y coherencia del proceso de análisis, sin menoscabo de la calidad del resultado final.
- 117 Asimismo, para facilitar nuestra labor, utilizamos una serie de bibliotecas de R, además de funciones  
 118 personalizadas escritas por nosotros para agilizar y optimizar las tareas de limpieza y representación de datos

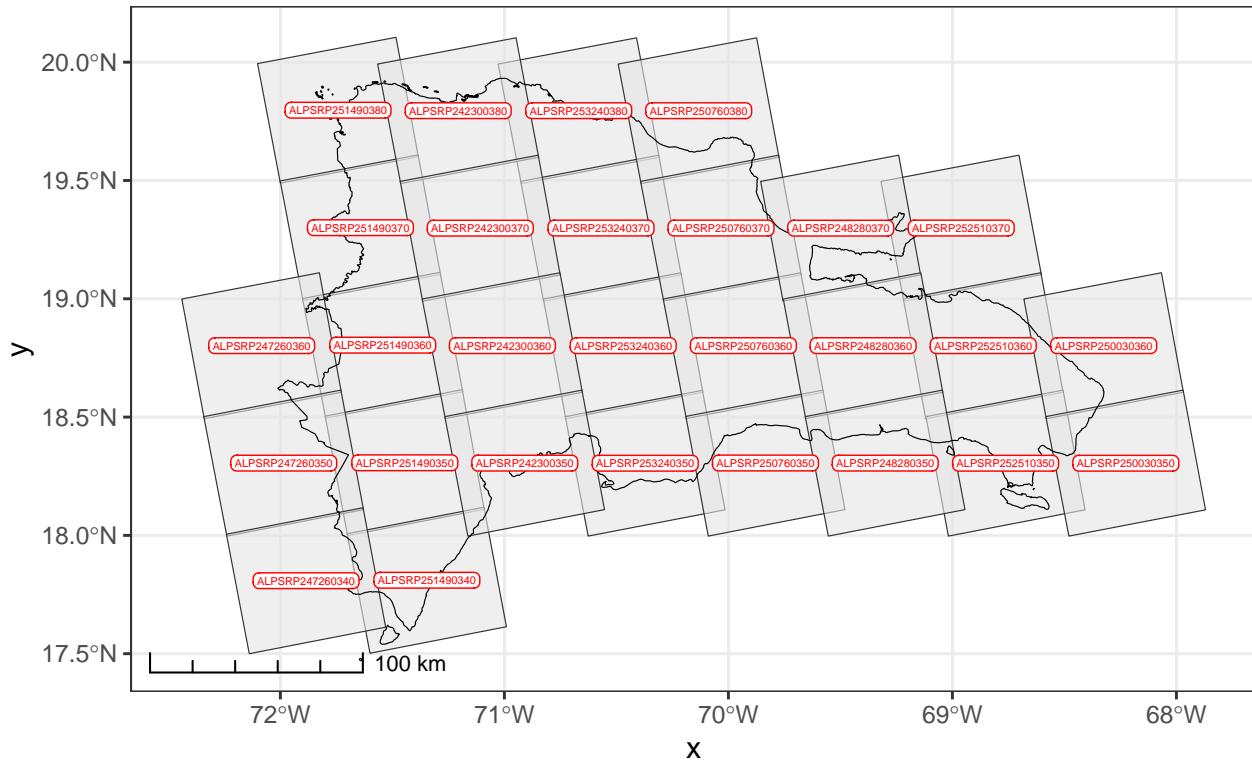


Figura 2: Mapa índice de las 28 escenas usadas en la formación del DEM de República Dominicana, superponiendo las huellas (polígono de área con datos) de las escenas ALOS PALSAR RTC sobre el límite costero e internacional del país

119 y mapas (Hijmans, 2023; O'Brien, 2023; Pebesma, 2018; Pebesma y Bivand, 2023; Wickham et al., 2019; Xie,  
 120 2014, 2015, 2023; Zhu, 2021). El código reproducible usado en el estudio se puede consultar en la sección  
 121 Información suplementaria, así como los repositorios creados al efecto, donde incluimos el código escrito y las  
 122 direcciones para acceder a los datos fuentes, entre otras utilidades.

123 Nos centramos en la fuente de datos, que en nuestro caso es el modelo digital de elevaciones (DEM) servido  
 124 con los productos *Hi-Res Terrain Corrected* de Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014). Este  
 125 producto se descarga desde el Centro de Archivo Activo Distribuido del Alaska Satellite Facility o ASF  
 126 DAAC—una de las instalaciones temáticas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los  
 127 Estados Unidos, NASA—en forma de escenas o “cuadros” (*tiles*), contenido dos imágenes de retrodispersión  
 128  $\gamma^0$  (ca. 70x58 km cada una), una por cada polaridad, y el modelo digital de elevaciones remuestreado con el  
 129 que ASF realizó la corrección radiométrica de terreno (ca. 80x70 km), objeto de nuestro estudio.

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

138 Para conformar un mosaico continuo del DEM de República Dominicana, seleccionamos y descargamos más de  
 139 40 escenas únicas de ALOS-PALSAR desde el ASF DAAC (JAXA/METI y ASF DAAC, 2015), minimizando  
 140 la redundancia espacial y eligiendo las versiones más recientes, conservando sólo 28 escenas distintas (Figura  
 141 2 y Tabla S1). Despues, extrajimos los DEM correspondientes de los archivos comprimidos y transformamos  
 142 aquellos proyectos en el huso 18N al 19N del sistema UTM. Posteriormente, creamos un mosaico continuo  
 143 (“sin costuras”) usando el formato de ráster virtual.

144 Posteriormente, creamos una base de datos, con su correspondiente localización, en GRASS GIS, nuestro  
 145 software principal por su eficiencia. Ocasionalmente recurrimos a otras herramientas como WhiteboxTools y  
 146 QGIS, siempre con el objetivo de optimizar el uso de los recursos de hardware para obtener los resultados  
 147 necesarios de manera rápida (GRASS Development Team, 2023; Lindsay, 2018; QGIS Development Team,  
 148 2021). Complementariamente, generamos una máscara de país en QGIS, fusionando el límite oficial de la  
 149 Oficina Nacional de Estadística con fuentes en línea como GADM, OCHA y OpenStreetMap, y excluyendo  
 150 superficies de lagos naturales y embalses para facilitar el análisis de cuencas endorreicas; este paso fue realizado  
 151 de forma semimanual. Posteriormente, importamos tanto el ráster virtual como la máscara a la base de datos  
 152 de GRASS GIS (Figura S1). Inmediatamente, aplicamos la máscara a la región activa para enfocar los análisis  
 153 sólo dentro del área de interés. (GADM, 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018;  
 154 OpenStreetMap contributors, 2017; QGIS Development Team, 2021).

155 Dentro de la base de datos de GRASS, rellenamos los datos nulos del DEM (Figura S2), para luego suavizar  
 156 el resultado preservando morfologías con la herramienta *FeaturePreservingSmoothing* de WhiteboxTools  
 157 (Figura S3) (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Tras esto, combinamos el DEM suavizado con el ráster de  
 158 altura del geóide EGM2008 mediante una simple suma algebraica para obtener alturas pseudo-ortométricas,  
 159 incrementando previamente la resolución del segundo para acercarla ligeramente a la del primero.

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

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

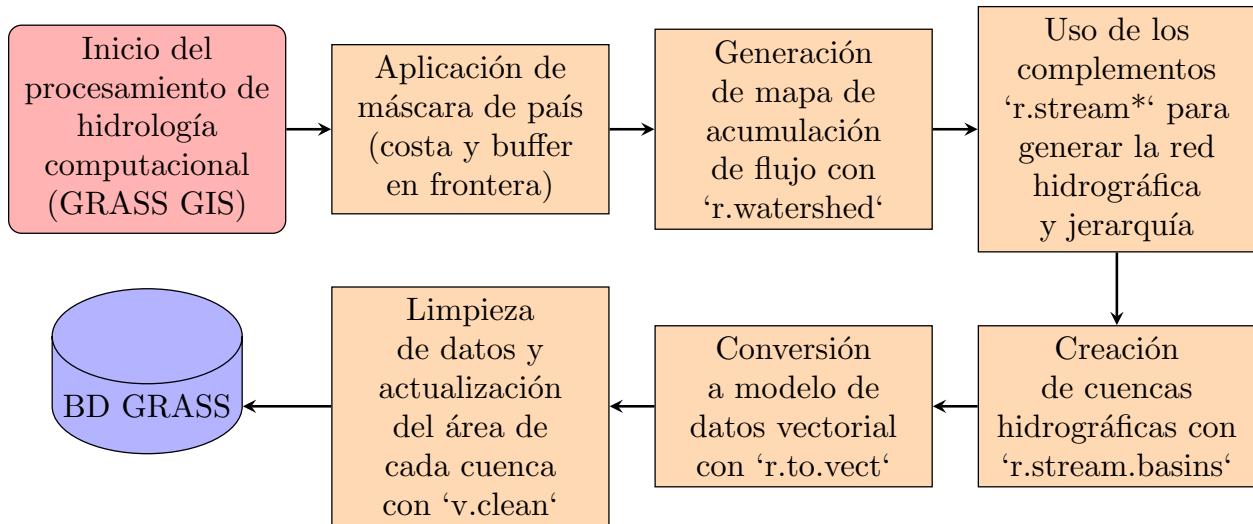
186 **2.2. Procesamiento de hidrología computacional**

Figura 3: Resumen gráfico del procesamiento de hidrología computacional

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

193 Antes de iniciar el procesamiento de hidrología computacional con GRASS GIS, aplicamos una máscara de  
 194 país, delimitada por la línea de costa y a los límites fronterizos, para evitar que las redes se extendieran más  
 195 allá de nuestra área de interés. Posteriormente, generamos el mapa de acumulación de flujo con el complemento  
 196 **r.watershed** (GRASS Development Team, 2022d) (Figura S9), y utilizamos este mapa como fuente de los  
 197 complementos de la familia **r.stream\*** para el estudio de redes de drenaje y jerarquía hidrográfica (Jasiewicz  
 198 y Metz, 2011). Dentro de esta familia se encuentran **r.stream.extract**, que usa el mapa de acumulación de  
 199 flujo generado por **r.watershed** para extraer la red, **r.stream.order** para calcular la jerarquía hidrográfica,  
 200 y **r.stream.basins** para crear cuencas hidrográficas en función de la referida jerarquía. En consecuencia,  
 201 aplicamos estos algoritmos al DEM para generar la hidrografía dominicana jerarquizada y la delimitación de  
 202 las cuencas según órdenes, proceso que sumarizamos a continuación.

203 Empleando el DEM y el mapa de acumulación creado con **r.watershed**, generamos la red hidrográfica  
 204 usando el complemento **r.stream.extract**, enfocándonos en la extracción de cursos indiferenciados, sin  
 205 caracterización hidrodinámica, sólo morfológica (Freeman, 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al.,  
 206 2021). Basándonos en experiencia de terreno y estudios previos, seleccionamos umbrales de acumulación de  
 207 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas respectivamente (Freeman, 1991; Marchesini et al.,  
 208 2021). Automatizamos la generación de las redes con un bucle **for** en Bash, iterando sobre cada umbral de  
 209 acumulación; para cada red generada (Figura S10), actualizamos la base de datos y creamos un resumen con  
 210 estadísticas básicas.

211 Para determinar la red hidrográfica óptima de alta densidad de República Dominicana, realizamos una  
 212 inspección visual de los tres resultados generados a partir de los umbrales de acumulación elegidos (Figura  
 213 S11). Tras evaluar las redes, seleccionamos la obtenida con el umbral de 540 celdas, por ajustarse a nuestros  
 214 criterios de selección. Sin embargo, para preservar la reproducibilidad de nuestros resultados y facilitar  
 215 eventuales aplicaciones futuras, decidimos conservar todos las redes en la base de datos, incluyendo las  
 216 originadas a partir de los umbrales de 180 y 900 celdas. En concreto, la red generada con el umbral 180 celdas,  
 217 presenta un buen ajuste con las vaguadas topográficas marcadas en el mapa topográfico (Figura S12).

218 A continuación, con el complemento **r.stream.order** de GRASS GIS, calculamos la jerarquía de la red  
 219 hidrográfica para cada uno de los umbrales de acumulación previamente establecidos (180, 540 y 900 celdas),

220 utilizando un bucle en Bash para automatizar el proceso. Este análisis permitió obtener la jerarquía de la  
 221 red hidrográfica de acuerdo a los métodos de Strahler y Horton, ofreciendo información útil para nuestros  
 222 objetivos (Horton, 1945; Strahler, 1957).

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

229 Finalizamos el procesamiento de hidrología computacional seleccionando solo las cuencas generadas para el  
 230 umbral de 540 celdas y las convertimos en un modelo de datos vectorial utilizando el complemento **r.to.vect**  
 231 de GRASS GIS, eliminando las cuencas de menos de 4000 m<sup>2</sup>. Este procedimiento incluyó la creación y  
 232 actualización de una nueva columna **strahler** en la tabla de atributos de cada capa vectorial para indicar  
 233 el correspondiente orden de red. Después de procesar y fusionar todas las cuencas de cada orden en una  
 234 única capa vectorial con **v.patch**, procedimos a limpiar y preparar los datos para el análisis. Este paso, que  
 235 incluyó la corrección de topología, la actualización del área de cada cuenca con **v.clean**, la eliminación de  
 236 áreas espurias y artefactos, resultó crítico para garantizar la precisión de nuestros resultados. Finalmente,  
 237 seleccionamos los datos válidos y los exportamos a un archivo de texto, lo que nos proporcionó valiosas  
 238 estadísticas del área para cada cuenca con desembocadura en mares, lagos o en pérdidas kársticas, según el  
 239 orden Strahler para nuestro análisis posterior.

### 240 3. Resultados

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

#### 247 3.1. Cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas

248 En el caso de las cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, en total delimitamos  
 249 6935 cuencas hidrográficas (Figura 4). Predominan cuencas de gran tamaño y anchura en los valles del Cibao  
 250 y de San Juan, así como en la periferia de la plataforma kárstica sudoriental. Por otro lado, las cuencas  
 251 medianas y de forma alargada con forma ligeramente ensanchada en cabecera, tienden a concentrarse a lo  
 252 largo del borde meridional de la Cordillera Central y en el karst de la plataforma sudoriental. Las cuencas  
 253 más pequeñas, en cambio, se distribuyen de manera más uniforme a través de los sistemas kársticos y zonas  
 254 costeras. Entre todas las cuencas delimitadas, se alcanzó una jerarquía de red máxima de ocho, condición que  
 255 sólo se observó en tres cuencas específicas: Yaque del Sur, Yuna y Ozama.

256 La cuenca más extensa, correspondiente al río Yaque del Norte, cubre una superficie de 6986 km<sup>2</sup>, aunque  
 257 sólo alcanzó orden máximo de siete, seguida de las cuencas de los ríos Yuna (4873 km<sup>2</sup>) y Yaque del Sur  
 258 (4614 km<sup>2</sup>), ambas con orden máximo de ocho (en la siguiente sección, discutimos sobre la discrepancia entre  
 259 las superficies de cuencas obtenidas por nosotros y los tamaños publicados en referencias existentes). El  
 260 tamaño promedio de las cuencas es de 7 km<sup>2</sup> y desviación estándar de 129 km<sup>2</sup>, reflejando la diversidad de  
 261 las cuencas hidrográficas presentes en el país.

262 La mitad de las cuencas delimitadas tiene 0.36 km<sup>2</sup> o menos de superficie, el 25 % de las cuencas más grandes  
 263 apenas supera los 0.85 km<sup>2</sup> y, de hecho, el 5 % más grande sólo alcanza 5.6 km<sup>2</sup> o más. Por lo tanto, la  
 264 distribución de las cuencas por tamaño es asimétrica hacia la derecha (asimetría calculada, 39.8), con un  
 265 importante número de cuencas pequeñas y pocas grandes, un patrón bastante común en este tipo de conjunto  
 266 de datos.

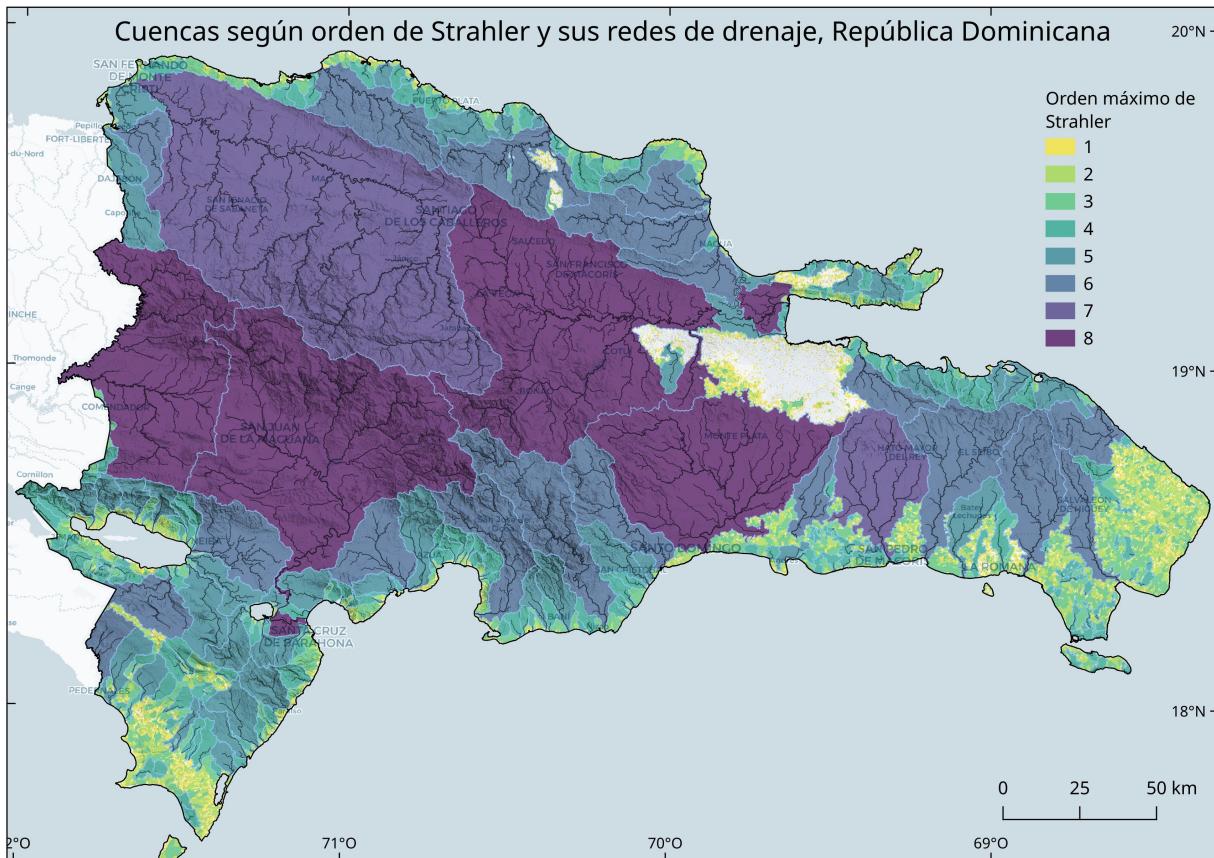


Figura 4: Cuenca que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas categorizadas según orden de Strahler de República Dominicana, y sus correspondientes redes de drenaje (sólo mostrando los cursos de orden 4 o superior). El umbral de acumulación usado para extraer la red fue de 540 celdas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

Tabla 1: Relación entre 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 promedio	Área total
1	4068	263967.4	1073819544
2	2026	957665.3	1940229996
3	606	3911579.4	2370417087
4	164	21545433.2	3533451043
5	46	111125189.5	5111758717
6	19	517463997.1	9831815945
7	2	3979801647.7	7959603295
8	4	3708474023.0	14833896092

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

272 Una caracterización de las cuencas que alcanzan un orden cuatro o mayor resulta también oportuna en este  
 273 caso, dado que las de orden de red inferior son muy numerosas y, por la naturaleza del DEM empleado, la

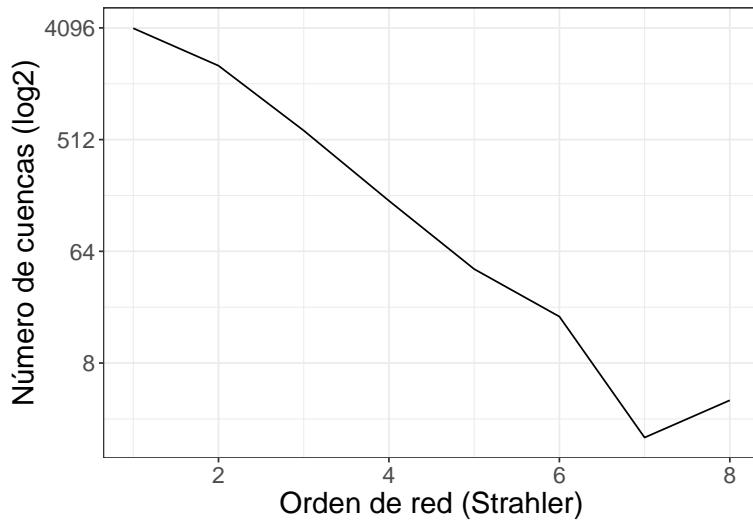


Figura 5: Número de cuencas que desembocan en mares, lagos, lagunas o en pérdidas kársticas, según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas ( $\sim 8$  hectáreas)

274 delimitación de las cuencas pequeñas es más propensa a error. Así, enfocando nuestro análisis sólo en las  
275 cuencas de orden cuatro o mayor, encontramos algunos patrones de interés que merecen mención.

276 Contabilizamos 235 cuencas de orden cuatro y mayor, lo que representa un 3.39 % del total nacional. Sin  
277 embargo, este pequeño porcentaje representa, en términos de superficie, el 88.5 % del área total de cuencas. En  
278 este subconjunto encontramos un tamaño mínimo de  $2.37 \text{ km}^2$ , promedio de  $176 \text{ km}^2$  y desviación estándar  
279 de  $129 \text{ km}^2$ . La mitad de las cuencas de orden cuatro y mayor  $25.68 \text{ km}^2$  o menos de superficie y, aunque este  
280 subconjunto de cuencas tiene mejor distribución, la asimetría a la derecha persiste (asimetría: 7.33).

### 281 3.2. Cuencas y subcuencas

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

Tabla 2: Estadísticos de superficie (en  $\text{km}^2$ ) de cuencas y subcuencas según orden de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas ( $\sim 8$  hectáreas)

Orden de red	Número	Media ( $\text{km}^2$ )	Mediana ( $\text{km}^2$ )	Desv. están- dar ( $\text{km}^2$ )	Mínimo ( $\text{km}^2$ )	Máximo ( $\text{km}^2$ )	Rango ( $\text{km}^2$ )	Sesgo	Curtosis
1	99783	0.29	0.23	0.21	0.00	3.33	3.33	2.35	9.78
2	22746	1.28	1.01	0.93	0.06	11.13	11.07	2.19	8.01
3	4930	5.73	4.47	4.29	0.58	36.26	35.68	2.09	6.46
4	1048	26.84	21.79	18.76	2.37	132.07	129.69	1.69	3.85
5	220	128.17	105.61	88.68	12.37	514.25	501.88	1.54	2.97
6	49	496.73	427.36	243.74	68.91	1031.78	962.88	0.36	-0.91
7	10	2042.74	1571.14	1815.15	664.63	6985.68	6321.06	2.69	7.78
8	4	3708.47	3648.35	1200.04	2663.91	4873.28	2209.37	0.04	-5.77

285 Debido a la relación exponencial entre el área y el orden de red, existe una diferencia significativa en el  
286 tamaño de las cuencas dependiendo de su orden. Las cuencas de orden 1 son considerablemente más pequeñas,  
287 con un tamaño promedio de menos de  $4 \text{ km}^2$ . En contraste, las cuencas de orden 8 son varios órdenes de  
288 magnitud más grandes, abarcando casi  $5000 \text{ km}^2$  en promedio. En lo que respecta a su abundancia, el patrón

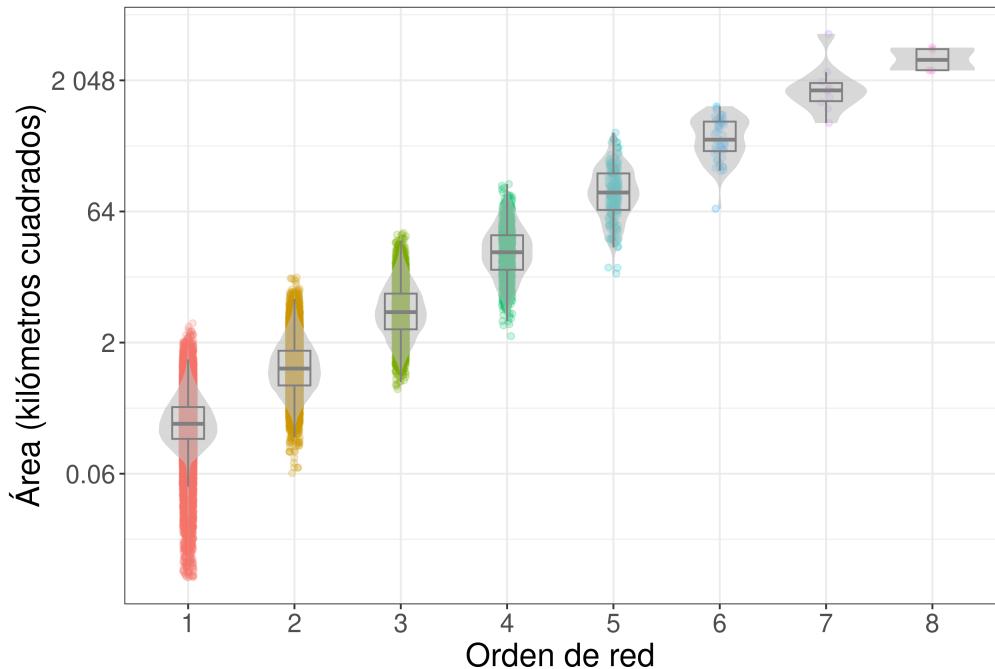


Figura 6: Área de las cuencas y subcuencas según órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas (~8 hectáreas)

289 se invierte. Las cuencas de orden 1 son las más frecuentes, contabilizando cerca de 100,000 en total. Por otro  
 290 lado, las cuencas de orden 8 son las menos comunes, con solamente cuatro identificadas en todo el territorio  
 291 dominicano. Las cuencas, en todos los órdenes, presentaron una distribución asimétrica de su superficie  
 292 calculada, salvo en el caso de las de orden seis, donde se alcanzó buena simetría.

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

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

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

- 317 Las subcuenca de orden cuatro, abarcando tamaños desde pequeñas hasta medianas y grandes, se encuentran  
 318 ampliamente distribuidas en toda la República Dominicana. Este grupo presenta características singulares  
 319 que detallaremos a continuación. Las grandes destacan generalmente por ser alargadas y por encontrarse  
 320 comúnmente orientadas según las estructuras geológicas, mientras que las medianas y pequeñas tienen mayor  
 321 razón de circularidad, y suelen repartirse de forma dispersa, rodeando cúmulos de cuencas grandes. De manera  
 322 particular, las subcuenca de orden cuatro son especialmente abundantes y grandes en todas las vertientes de  
 323 la cordillera Central (más escasas al norte), así como en las vertientes meridionales de la cordillera Oriental y  
 324 de las sierras de Yamasá y Bahoruco. Igualmente, destacan cúmulos de cuencas de orden cuatro de tamaño  
 325 grande en determinados sectores de la cordillera Septentrional.
- 326 En la cordillera Central, las subcuenca grandes de orden cuatro se concentran en torno a su eje principal  
 327 noroeste-sudeste, especialmente en los alrededores de sus máximas elevaciones (Alto Bandera, picos Duarte y  
 328 La Pelona), en las vertientes de enlace con los valles altos y medios (e.g. Valle de Bao, Valle Nuevo, Constanza,  
 329 Jarabacoa), dentro del denominado “Cinturón de Peralta”—según Hernández Huerta y Andrés (2002), se trata  
 330 de un sistema de cabalgamientos imbricado con pliegues, de vergencia hacia el sur, dentro de la denominada  
 331 cuenca sedimentaria de Azua—, y en el borde sudoriental, concretamente en niveles medios y altos de las  
 332 cuencas de los ríos Nizao, Haina, Nigua.
- 333 En la sierra de Yamasá y en la cordillera Oriental, las subcuenca de orden cuatro, particularmente las grandes,  
 334 forman cúmulos densos integrados dentro de cuencas de orden superior, como las del Ozama, Maguá, Chavón,  
 335 Cumayasa y Duey. En la sierra de Bahoruco, las subcuenca de orden cuatro son particularmente grandes en la  
 336 vertiente sur, en concreto en el subsistema denominado “Bahoruco Occidental”—según Martínez-Batlle (2012),  
 337 se trata de un sistema montañoso de morfologías de superficies corrosivas Fini-Paleógenas y Fini-Pliocenas  
 338 labradas sobre calizas Cenozoicas, escalonadas desde 2200 m hasta los 100 m—y hacia el enlace con el Hoyo  
 339 de Pelempito—uno de los más conocidos *poljes* dominicanos. En este caso, se trata de cuencas sin cursos  
 340 fluviales permanentes, en las que la infiltración logra abrirse paso a través del karst. Finalmente, las cuencas  
 341 de orden cuatro en la cordillera septentrional, se localizan especialmente en los niveles intermedios y altos de  
 342 la cuenca del río Bajabonico, así como hacia al norte de las ciudades de Santiago, Salcedo y San Francisco de  
 343 Macorís. Destaca particularmente la alargada subcuenca de orden cuatro del río Nagua, con casi 130 km<sup>2</sup>, la  
 344 cual sigue el rumbo predominante—noroeste-sudeste—de la Falla Septentrional.
- 345 Las cuencas y subcuenca pertenecientes a los órdenes cinco y seis exhiben patrones de distribución espacial  
 346 notablemente parecidos.

### 347 3.3. Red de drenaje

- 348 La longitud total de *talwegs* obtenidos es de ### kilómetros, con el río más largo extendiéndose por ###  
 349 kilómetros. Este nivel de detalle en la cartografía de ríos y corrientes supera significativamente a los modelos  
 350 previos existentes, permitiendo una mejor comprensión y análisis de los patrones de flujo de agua en la  
 351 República Dominicana (Figura 8).
- 352 En cuanto a la jerarquía de la red, se observó un rango desde ### (la menor jerarquía) hasta ### (la  
 353 mayor jerarquía), lo que indica una diversidad significativa en la configuración de las corrientes de agua. Esta  
 354 jerarquía hidrográfica proporciona información valiosa para comprender la estructura y el funcionamiento de  
 355 las cuencas.
- 356 Además, la inclusión de las redes generadas con los umbrales de 180 y 900 celdas en la base de datos añade  
 357 un nivel adicional de detalle y versatilidad, ofreciendo diversas opciones para futuros estudios o aplicaciones  
 358 que requieran diferentes niveles de resolución. Cabe mencionar que la red generada con un umbral de 180  
 359 celdas resultó en la mayor cantidad de cuencas hidrográficas identificadas, mientras que la red generada con  
 360 el umbral de 900 celdas proporcionó las representaciones más simplificadas de las cuencas.
- 361 En cuanto a la distribución de cursos según jerarquía hidrográfica, la red generada con el umbral de 8 hectáreas  
 362 alcanzó un orden máximo de 8 según los métodos de Strahler y Horton. Tanto la distribución del número de  
 363 cursos como la suma de longitudes según órdenes jerárquicos, presentan un relación inversa exponencial.

## 364 4. Discusión

- 365 Por el énfasis que hemos puesto en la generación de la red hidrográfica y la detallada metodología, nuestro  
 366 trabajo es un artículo de datos y metodológico a la vez.
- 367 Para lograr una rápida salida del trabajo, dejamos para futuras investigaciones lo siguiente:

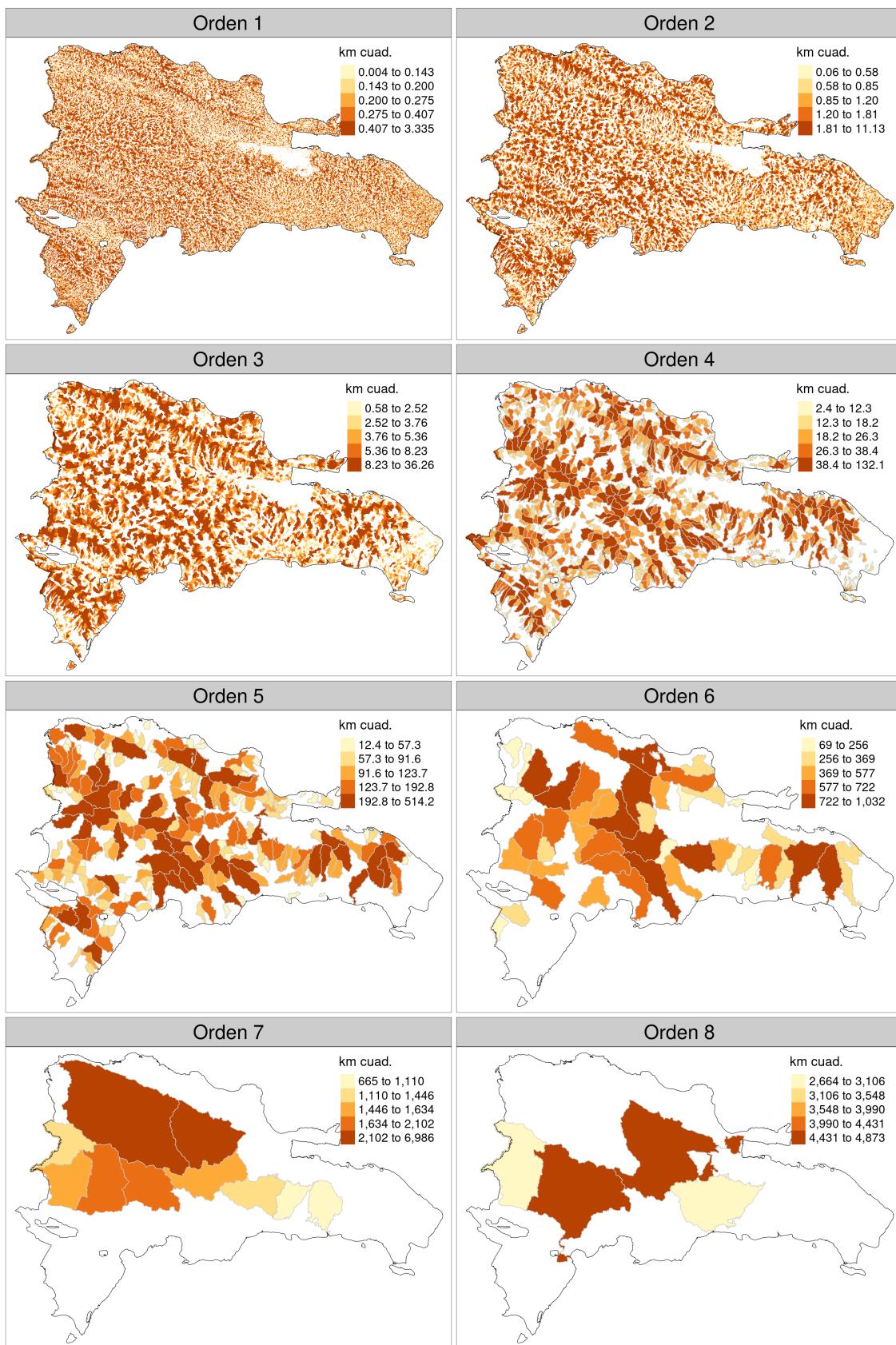


Figura 7: Distribución espacial de las cuencas y subcuencas según superficie calculada y órdenes de red de Strahler para el umbral de acumulación 540 celdas ( $\sim 8$  hectáreas)

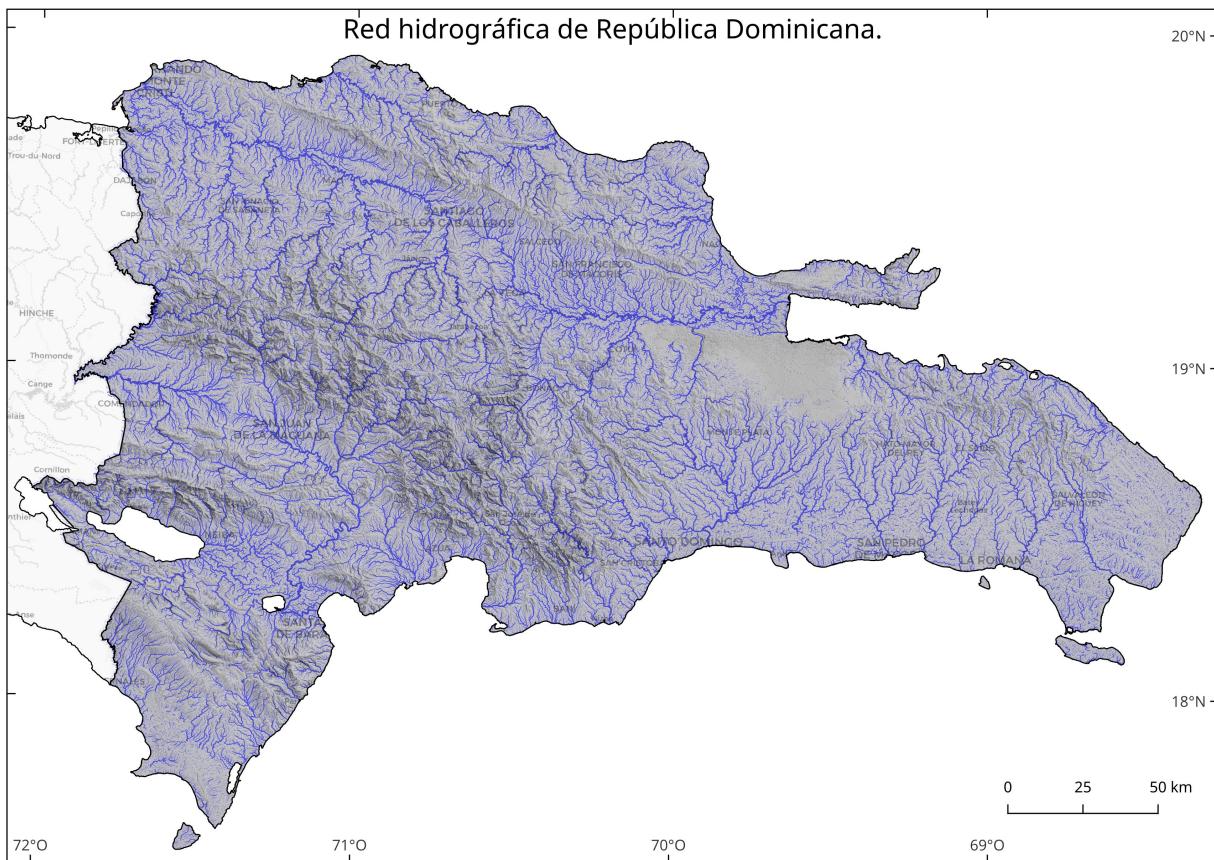


Figura 8: Representación de la red hidrográfica dominicana simbolizando el grosor de los segmentos en función de su orden de red (método de Strahler). El orden máximo alcanzado fue de 8. Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 540 celdas (~8 ha)

- 368   ■ El patrón exponencial entre area~orden y número~1/orden confirma la lógica de la jerarquización  
369   fluvial, donde se espera que los ríos de mayor orden, y por ende mayor tamaño, sean menos numerosos  
370   que los de menor orden.
- 371   ■ Evaluación de precisión de la elevación.
- 372   ■ Nuestro interés gira en torno a la aplicabilidad de la hidrografía sistemáticamente generada, no  
373   necesariamente a las métricas, pues el modelo digital de elevaciones usado tiene error, y la información  
374   de terreno es insuficiente.
- 375   ■ El drenaje en las áreas de desembocadura, especialmente en los casos de Yuna y Yaque de Sur.
- 376   ■ Morfometría de redes y morfometría de cuencas, para próximos trabajos.
- 377   ■ Mejora de la hidrografía de las áreas llanas (esperaremos mejores fuentes de elevación, e.g. TanDEM-X)
- 378   ■ Las diferencias en cuanto a superficie de las cuencas, e.g. Yuna y Yaque del Sur.
- 379   ■ Análisis hortonianos exhaustivos.
- 380   ■ Segregación de la red teórica y la red circulante.
- 381   ■ Con respecto a la precisión posicional de la red, estimamos que es alta en sistemas montañosos no  
382   kársticos, y moderada en sistemas kársticos. En los sistemas kársticos en particular, nuestro mapa  
383   exhibe un grado ligeramente mayor de incertidumbre debido a la ausencia de un catálogo detallado y  
384   preciso de depresiones, como las dolinas, que en última instancia definen la topología y jerarquización  
385   de la red en estos relieves. Para subsanar esta carencia, generamos nuestro propio inventario de  
386   depresiones a partir del modelo de elevaciones seleccionado, aunque lo aplicamos con prudencia a la  
387   hora de determinar la ubicación de los sumideros reales donde el flujo se infiltra al karst. Es relevante  
388   mencionar que nuestra red podría presentar una precisión reducida en áreas urbanas y llanas, así  
389   como en terrenos con canales de riego. Sin embargo, este factor no impacta la relevancia de nuestro  
390   estudio, dado que se enfoca primordialmente en otros tipos de áreas.

- 391     ■ En relación a las cuencas y redes de drenaje transfronterizas, es importante destacar que sólo se  
392        caracterizaron utilizando información la porción correspondiente al territorio dominicano. Como  
393        resultado, el orden de red máximo obtenido para estas redes podría no reflejar su orden real. Estas  
394        cuencas abarcan las de los ríos Artibonito, Pedernales y Masacre, además de varias cuencas menores  
395        dispersas a lo largo de la frontera. No obstante, una evaluación visual preliminar indica que la  
396        mencionada limitación no interfiere con el propósito de nuestro estudio. Además, en futuros trabajos,  
397        abordaremos estas cuencas de manera integral para proporcionar una visión más completa de su  
398        morfometría.  
399     ■ Para asegurar que los datos de elevación eran adecuados y precisos en términos de elevación, se  
400        debería validar el DEM con datos de puntos de verificación tomados con GNSS.  
401     ■ Estudiar patrones de asociación entre variables de cuencas (área, longitud, anchura, razón de  
402        circularidad, etc., muchos de los cuales se obtienen con `r.basin`) en relación con elevación promedio,  
403        pendiente promedio, litología, etc.

404 **Declaración de conflicto de intereses**

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

406 **Disponibilidad de datos, scripts y código**

407 Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en Zenodo en <https://doi.org/10.5281/zenodo.8146391> (Martínez-Batlle y Izzo-Gioiosa, 2023). Los scripts utilizados para la  
408 curación de datos, análisis y visualización están disponibles en esta sección, así como en el repositorio de  
409 GitHub en <https://github.com/geofis/red-hidrografica-densa-rd> y en Zenodo en (RELENAR?).  
410

## 411 Información suplementaria

### 412 Suplemento metodológico para la subsección “Obtención y Preprocesamiento del DEM”

413 Los siguientes bloques de código cargan los paquetes de uso común a lo largo de este cuaderno, así como  
 414 funciones creadas por nosotros para eficientizar las tareas de limpieza y representación de datos y mapas.  
 415 Igualmente, aprovechamos este bloque de código para declarar la ruta del directorio donde se alojan los  
 416 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)
source('R/funciones.R')
dem_proc_dir <- 'estadisticos'
figuras <- 'figuras'
umbral_espurias <- 4000 #Umbral por debajo del cual se considera una cuenca como espuria
```

417 Descargamos 42 escenas ALOS PALSAR RTC, específicamente los *Hi-Res Terrain Corrected*, desde el  
 418 Centro de Archivo Activo Distribuido (DAAC) del Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF DAAC, 2014), para  
 419 posteriormente depurarlas y seleccionar las más idóneas para unirlas en un mosaico creado como ráster virtual.  
 420 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
```

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

432 Identificamos las escenas necesarias para cubrir íntegramente la República Dominicana, usando una búsqueda  
 433 geográfica mediante polígono delimitador en ASF. Dado que la misión del ALOS-PALSAR ofrece escenas  
 434 de distintas fechas para una misma área, las descargamos todas y posteriormente excluimos del análisis las  
 435 redundantes, conservando siempre la más reciente. Utilizando el índice de huellas de escenas, escribimos un  
 436 pequeño programa para seleccionar las más recientes allí donde hubiese redundancia. Con esto construimos  
 437 un índice de DEM para guiarlos 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

438 En total, para cubrir el territorio de República Dominicana, necesitamos 28 de escenas únicas ALOS PALSAR  
 439 RTC. Señalamos en este punto un detalle relevante para el análisis hidrológico. Las escenas correspondientes  
 440 a la porción haitiana del río Artibonito, no las procesamos en este estudio, a efectos de agilizar la producción  
 441 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') +
  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')
```

442 Usando como referencia el índice de escenas seleccionadas, extrajimos los DEM correspondientes, incluidos  
 443 en formato GTiff dentro de los archivos comprimidos (.zip). Este formato es proporcionado por el Alaska  
 444 Satellite Facility para minimizar el uso del ancho de banda durante las descargas, lo que resulta beneficioso  
 445 para el rendimiento de sus servidores. A pesar de estar comprimidos, la descompresión de estos archivos no  
 446 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)))
       )
```

447 Todos los DEM fueron proporcionados por ASF en el sistema de coordenadas Universal Transversal de  
 448 Mercator (UTM). Sin embargo, los situados al oeste fueron suministrados en el huso 18N. Identificamos estos  
 449 DEM y los transformamos al huso 19N, que es el que corresponde a nuestra área, con el objetivo de generar  
 450 un producto continuo. Para realizar esta transformación, empleamos la herramienta gdalwarp de la biblioteca  
 451 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)})
```

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

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

459 Posteriormente, creamos la base de datos y localización de GRASS GIS usando como fuente de extensión y  
 460 resolución el ráster virtual (GRASS Development Team, 2023). Decidimos usar GRASS GIS a partir de este

461 punto para prácticamente todas las tareas de análisis geoespacial e hidrológico, pues se trata de un software  
 462 bastante eficiente en muchos de sus complementos y algoritmos de serie (e.g. relleno de nulos). Sin embargo,  
 463 en pasos posteriores, alternamos el flujo de procesamiento con otras herramientas, como WhiteboxTools  
 464 (Lindsay, 2018). En todo caso, nuestro criterio fue siempre aprovechar al máximo los recursos de hardware y  
 465 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/
```

466 Luego creamos una máscara de país en QGIS (QGIS Development Team, 2021), superponiendo el límite  
 467 oficial obtenido desde la página de la Oficina Nacional de Estadística (ONE), y combinándolo con otras  
 468 fuentes disponibles en línea, como GADM, Humanitarian Data Exchange (OCHA) y OpenStreetMap (GADM,  
 469 2022; OCHA, 2022; Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2018; OpenStreetMap contributors, 2017). De la  
 470 máscara, eliminamos las superficies de máximas de lagos y lagunas no artificiales, pues nos interesa procesar  
 471 las cuencas endorreicas que drenan hacia ellos. No obstante, los embalses no los incluimos en dicha superficie,  
 472 dado que necesitamos construir la jerarquía de red ignorando su presencia, es decir, asumiendo como continuos  
 473 todos los cursos fluviales. Sobre esta máscara, creamos un área de influencia, para recortar el DEM con un  
 474 cierto “acolchado” que nos permitiera analizar sin dificultades las áreas costeras y de frontera. La creación de  
 475 esta máscara fue el único paso que realizamos de forma semimanual, pues el resto del flujo de procesamiento  
 476 lo realizamos con algoritmo automáticos.

477 Posteriormente, importamos la máscara generada a la base de datos de GRASS y la aplicamos. GRASS opera  
 478 de forma eficiente, circunscribiendo la aplicación de los algoritmos al área definida como máscara. Las áreas  
 479 fuera de ésta son excluidas, eficientizando los recursos y evitando malgastar tiempo de CPU en áreas que  
 480 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
```

481 Importamos el ráster virtual a la base de datos de GRASS GIS con la herramienta `r.import`. Con este paso  
 482 generamos un mapa ráster dentro de la base de datos GRASS GIS, el cual es una realización con celdas  
 483 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
```

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

```
# Rellenar vacíos
time r.fillnulls --overwrite --verbose \
```

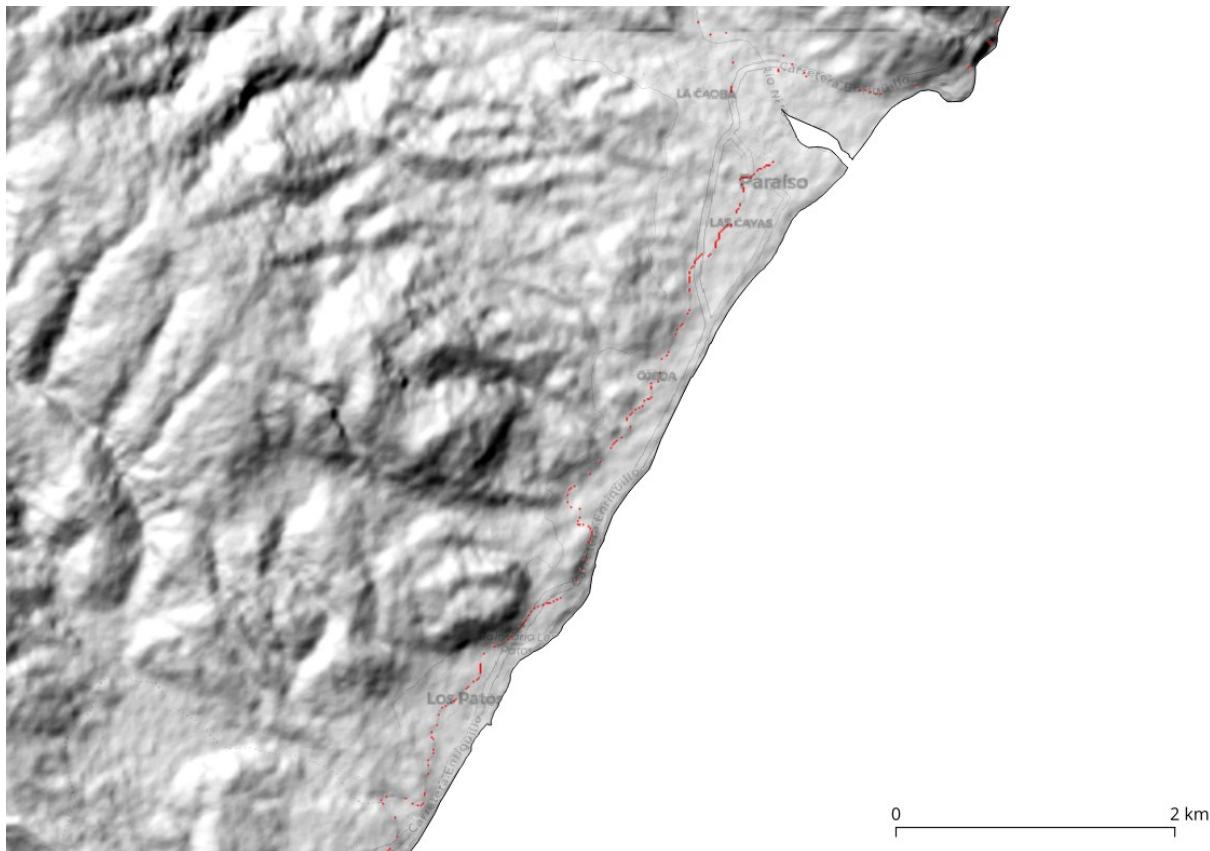


Figura S1: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Nótese los píxeles sin datos, destacados en color rojo (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```

488 input=dem method="bilinear" \
489 tension=40 smooth=0.1 edge=3 npmin=600 segmax=300 lambda=0.01 \
490 output=dem_relleno
# Enviar mensaje al finalizar (ejecutar conjuntamente con anterior)
491 echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
492 ## real 10m11.925s

```

488 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  
 489 (Lindsay, 2018; Lindsay et al., 2019). Para aplicar esta herramienta, primero exportamos el DEM desde la  
 490 base de datos de GRASS GIS a archivo GeoTIFF, y posteriormente aplicamos el suavizado. Finalmente,  
 491 importamos el DEM suavizado nuevamente a la base de datos de GRASS GIS para continuar el procesamiento  
 492 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-patios-dem/rd/dem/' \

```

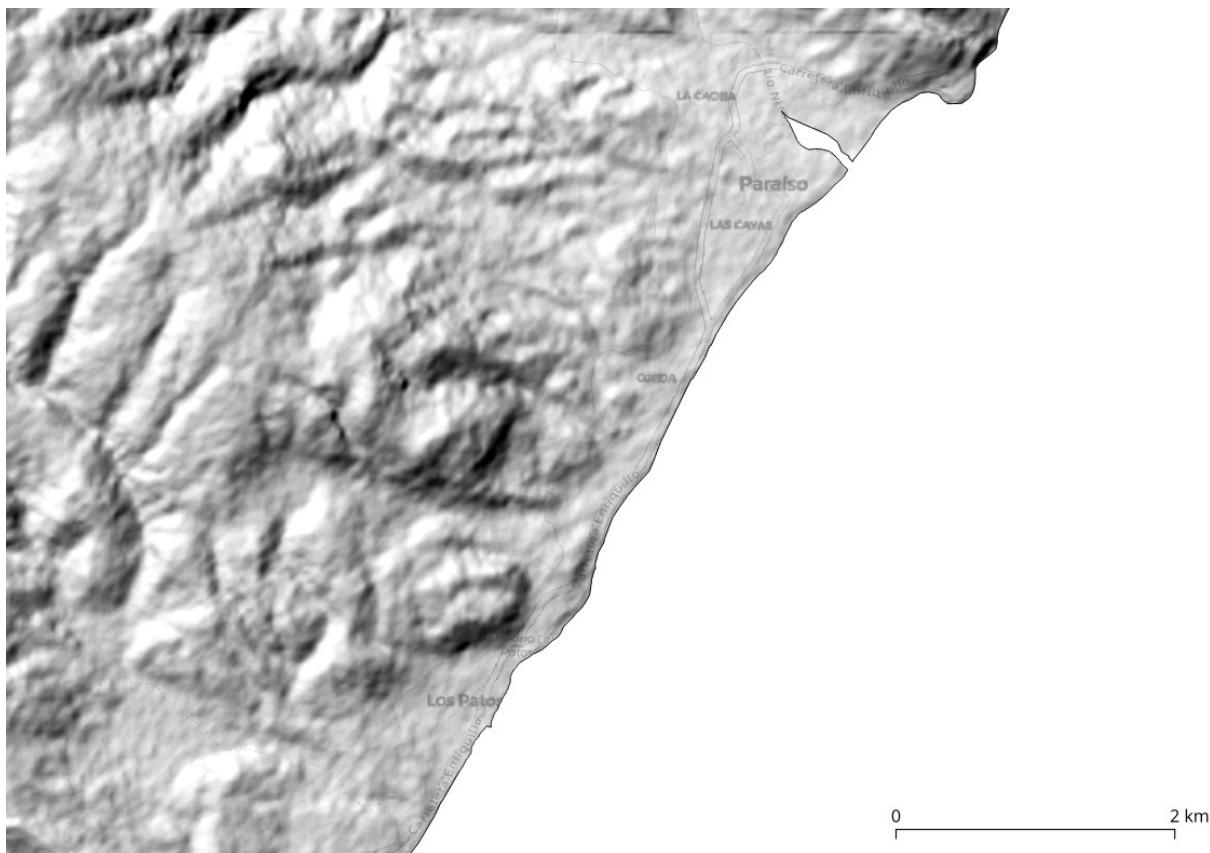


Figura S2: DEM sin procesar, representado como relieve sombreado. Los píxeles sin datos fueron eliminados (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```
--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
```

494 A continuación, usamos el ráster de altura de geoide de La Española a 1 minuto de resolución (EGM2008)  
 495 para obtener alturas pseudo-ortométricas, por medio de una suma algebraica simple de este ráster y el DEM  
 496 suavizado en GRASS GIS con la herramienta `r.mapcalc`. Sin embargo, previamente fue necesario aumentar  
 497 la resolución del ráster de altura del geoide antes de realizar la suma. Para esto, usamos `r.resamp.rst`  
 498 (evaluamos una segunda alternativa con el complemento `r.resamp.interp` y, aunque realizó el trabajo  
 499 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
```

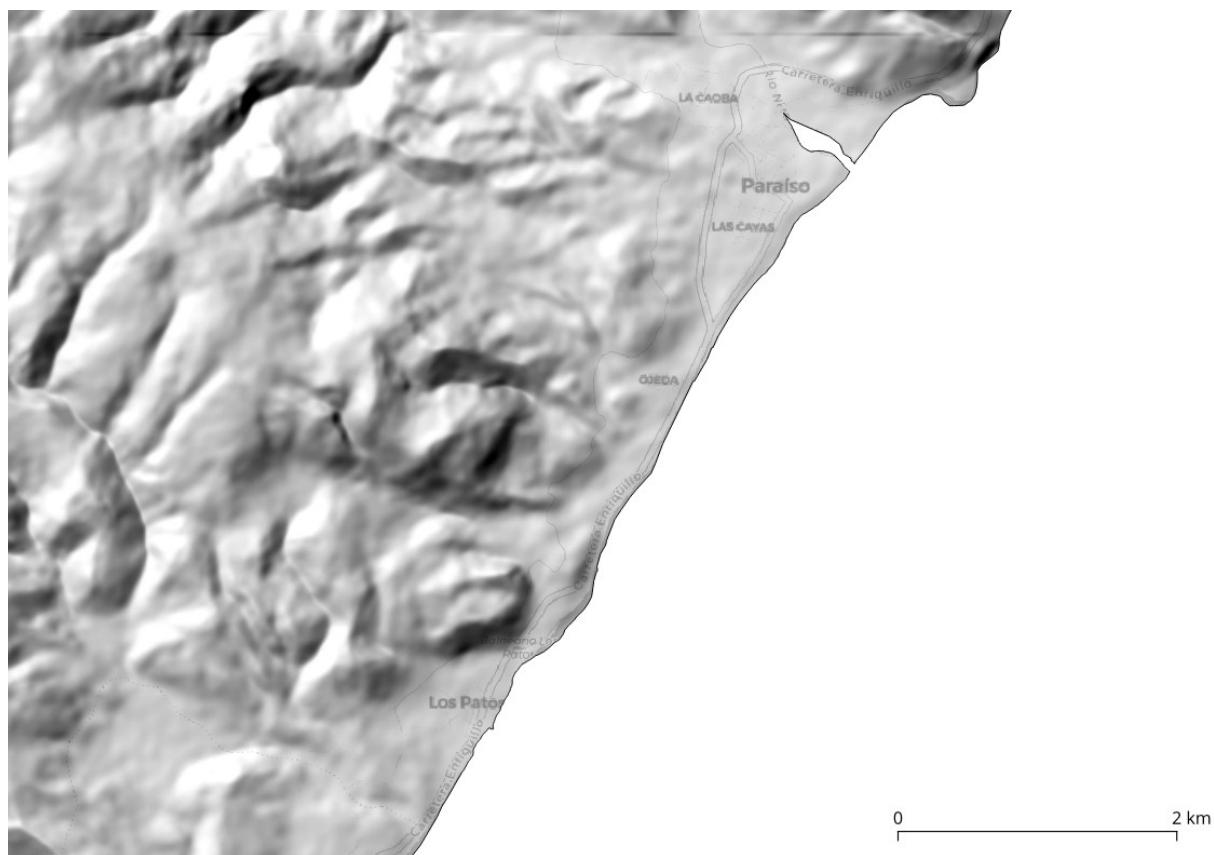


Figura S3: DEM suavizado, representado como relieve sombreado. Nótese la conservación de las morfologías principales y la eliminación del ruido sobre éstas (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

```

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
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 geoide
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 relleno y suavizado
g.region raster=dem_suavizado -ap

```

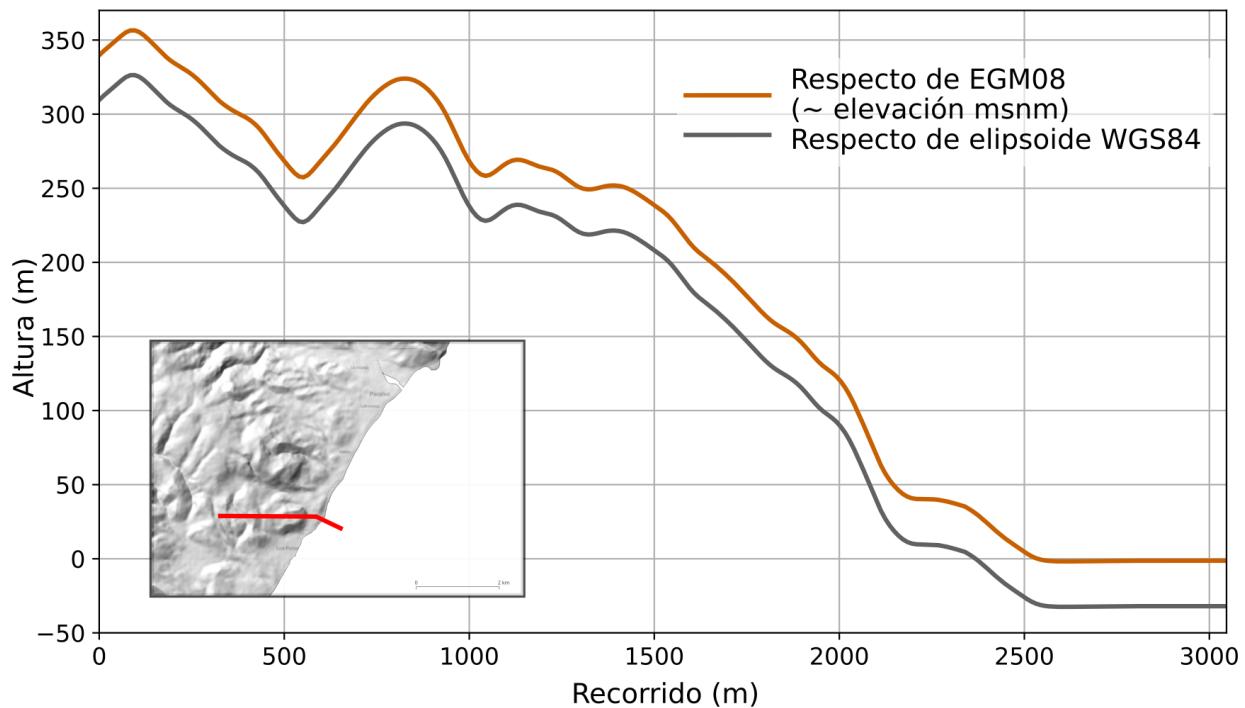


Figura S4: Alturas respecto de geoide EGM08 (~ortométrica) y sobre elipsoide WGS84, de un transecto descendente desde Bahoruco Oriental al Mar Caribe (Los Patos-Ojeda-Paraíso, provincia Barahona, sudoeste de República Dominicana)

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

#Estadísticos univariados
r.univar dem_pseudo_ortometrico
# n: 306462417
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34
# range: 3153.79
# mean: 403.703
# mean of absolute values: 403.858
# standard deviation: 487.27
# variance: 237432
# variation coefficient: 120.7%
# sum: 123719658638.311
```

- 500 El resumen estadístico proporcionado por la herramienta `r.univar` de GRASS GIS, usando la máscara  
 501 ajustada a los límites costeros e internacional del país, informa que la elevación mínima es -51.5 m, mientras  
 502 que la máxima es 3102.34 m, para un rango de casi 3154 m. El valor mínimo probablemente no está bien  
 503 recogido, debido a que la máscara empleada podría estar eliminando elevaciones muy bajas en el área  
 504 de la Hoya de Enriquillo. La elevación media, considerando tanto los negativos como los positivos, es de  
 505 aproximadamente 404 m, con desviación estándar de 487 m y coeficiente de variación de 121 %. Remarcamos  
 506 que, aunque ASF advierte de no usar este modelo para fines de elevación, el valor máximo se ajusta bastante a  
 507 la elevación máxima conocida en República Dominicana, que es el pico Duarte (Instituto Geográfico Nacional,  
 508 2022).
- 509 A continuación, efectuamos el procedimiento de tallado o grabado de una red preexistente sobre el DEM,  
 510 conocido como *stream burning* (Lindsay, 2016). Con este procedimiento, logramos que los píxeles del DEM

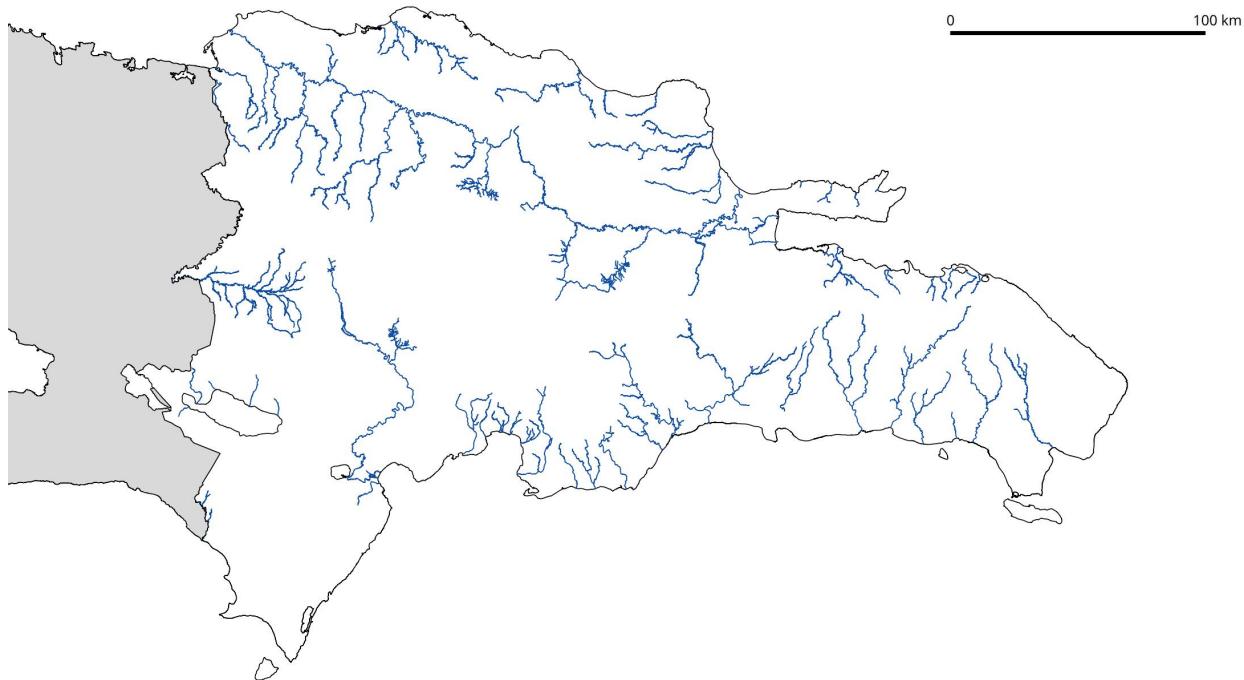


Figura S5: Mapa de la red de cursos largos creada para el estudio a partir de varias fuentes (más detalles, en el texto).

511 intersectados con el vectorial de la red preexistente, adquieran un valor muy bajo respecto de su entorno,  
 512 para asegurar que los algoritmos automáticos de análisis hidrológico dirijan el flujo a través de los lechos  
 513 de ríos establecidos. El tallado es particularmente útil, incluso esencial, en áreas planas, ya que ayuda a los  
 514 algoritmos automáticos a producir redes hidrográficas más realistas y topológicamente correctas. Sin embargo,  
 515 su aplicación requiere de una cuidadosa selección de la red preexistente a tallar. Para crearla, usamos  
 516 una red de drenaje de cursos fluviales seleccionados, que incluyó sólo los de gran longitud, comúnmente ríos  
 517 permanentes, de lecho ancho y claramente establecidos. Nos apoyamos en imágenes satelitales (Google; Airbus,  
 518 CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey, 2023) y, ocasionalmente, en  
 519 el MTN-50K (Instituto Cartográfico Militar (ICM), 1989). Complementamos con OpenStreetMap contributors  
 520 (2017), ya que este servicio provee información vectorial de fácil acceso y precisa. El resultado consistió en una  
 521 red de cursos largos seleccionados de República Dominicana, representada por los ríos Artibonito, Yaque del  
 522 Norte, Yuna, Yaque del Sur, varios ríos del extremo meridional de la cordillera Central y del borde sudoriental  
 523 del país, así como algunos ríos seleccionados de la cordillera Septentrional.

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

```
# Importar red a GRASS
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

```

529 Finalmente, importamos nuestra red de cursos largos a la base de datos de GRASS GIS y generamos  
 530 estadísticas básicas. Se trata de una red compuesta por **1047 segmentos** que suman un total de **4895.88**  
 531 **kilómetros** de longitud. Cabe señalar que esta red no tiene valor hidrográfico, pues, como indicamos, ignora  
 532 los lagos para garantizar la integridad topológica. Desaconsejamos su uso para otro fin que no sea el grabado  
 533 de un DEM.

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

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

```

# Limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS

# Tallar red de cursos largos
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

```

555 Posteriormente, probamos el tallado usando álgebra de mapas con herramienta **r.mapcalc** de GRASS GIS  
 556 (GRASS Development Team, 2022a; GRASS Development Team, 2022c; Larson et al., 1991; Shapiro y  
 557 Westervelt, 1994). Para tallar con álgebra de mapas, primero normalizamos el DEM, generamos una capa  
 558 booleana ráster con la red de cursos largos, la restamos al DEM normalizado y luego, para restablecer los  
 559 valores originales fuera de las áreas talladas, multiplicamos el ráster resultante de la resta nuevamente por el  
 560 rango del DEM (máximo - mínimo). El resultado es un DEM tallado, en el que sólo los píxeles por donde  
 561 circula la red quedaron con una profundidad equivalente al rango.

```

# Limpiar red manualmente en QGIS
# Para mejorar la topología, se puede aplicar v.clean directamente en QGIS

# Tallar
# Rasterizar red (los píxeles de la red valdrán 1, el resto, nulo)

```

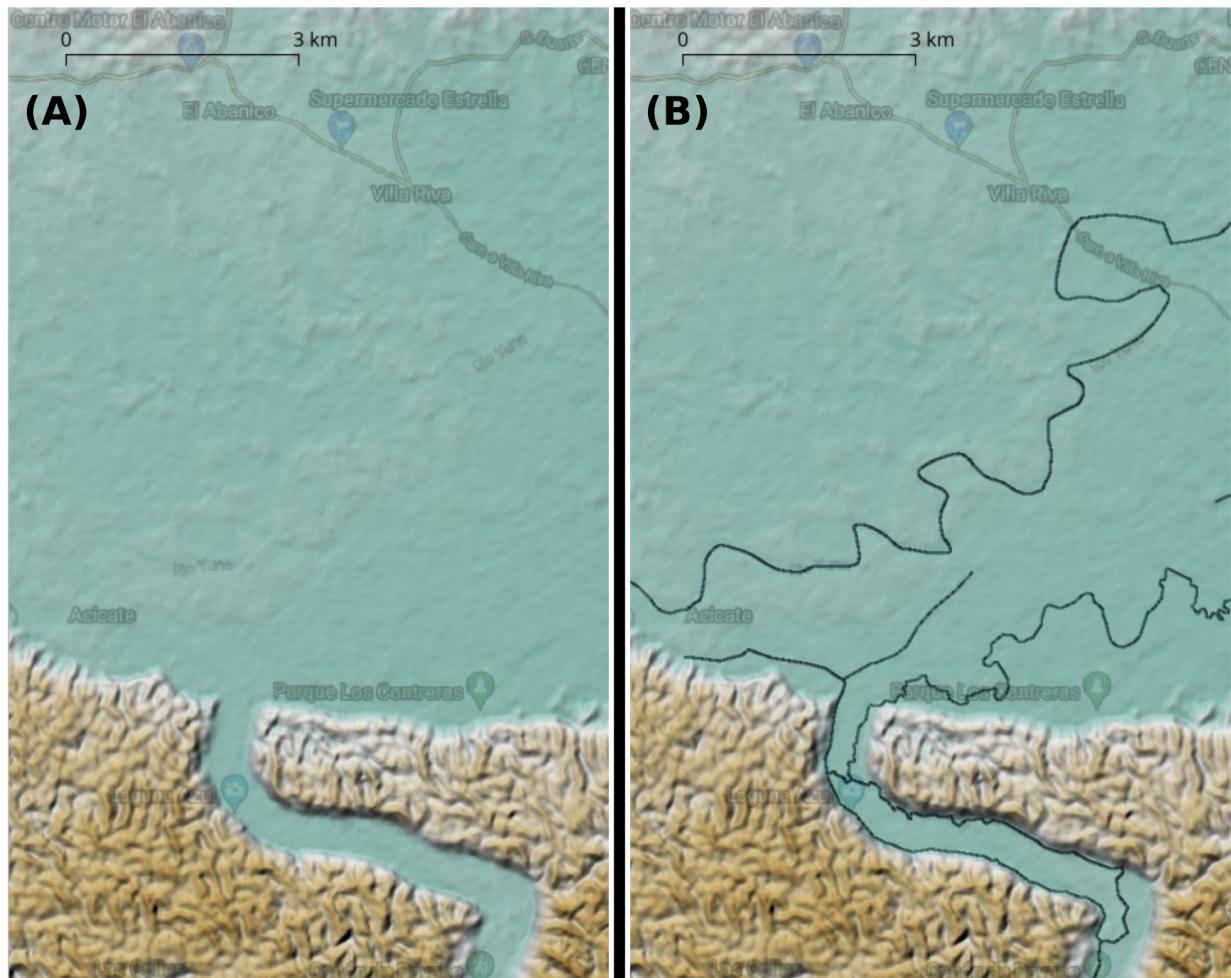


Figura S6: DEM sin aplicación de hidrografía (A), y con aplicación de hidrografía seleccionada (B). El DEM se representa como relieve sombreado y la aplicación se denota como un grabado oscurecido (cañón del río Payabo, Los Haitises, y río Yuna (proximidades de Arenoso, nordeste de República Dominicana)

```
v.to.rast --overwrite input=red_mtn50k_cleaned_largos type=line use=val \
    output=red_mtn50k_cleaned_largos
# Convertir nulos a cero
r.null map=red_mtn50k_cleaned_largos null=0
# Determinar estadísticas univariantes del DEM
r.univar map=dem_pseudo_ortometrico
# minimum: -51.4456
# maximum: 3102.34

# Aplicar normalización y resta
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
# dem_tallado = stddemburn * dem_pseudo_ortometrico # Alternativa
EOF
echo "Tallado finalizado" | mail -s "Mensaje sobre tallado" USUARIO@MAIL
```

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

```
# 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/alo-palsar-dem-rd/',
    'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.gpkg'),
  dst_datasource_name = paste0('/media/jose/datos/alo-palsar-dem-rd/',
    'dem/red_mtn50k_cleaned_largos.shp'),
  verbose=TRUE)

# Tallar con WBT
time ~/WhiteboxTools_linux_amd64/WBT/whitebox_tools \
  --wd='/media/jose/datos/alo-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
```

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

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

584 No obstante, nuestro resultado debe tomarse con cautela en el relieve kárstico. Como bien es sabido, no  
 585 todas las calizas representadas en la geología dominicana están lo suficientemente karstificadas como para  
 586 desarrollar depresiones. Por esta razón, usamos la capa de calizas a discreción, y sólo conservamos aquellos  
 587 afloramientos de calizas en los que, desde nuestro conocimiento de terreno, no se evidenciaba escorrentía  
 588 superficial. Asimismo, reservamos aquellas calizas donde encontramos evidencia de depresiones en la topografía  
 589 detallada y en imágenes satelitales. No obstante, gran parte de este trabajo se realizó manualmente, por lo  
 590 que nuestra colección de dolinas tiene suficiente precisión, pero no es exhaustiva. Además, es virtualmente  
 591 imposible identificar todas las depresiones que funcionan como pérdidas en imágenes satelitales o en mapas  
 592 topográficos y geológicos. Finalmente, un elemento adicional complica aún más las cosas en los relieves

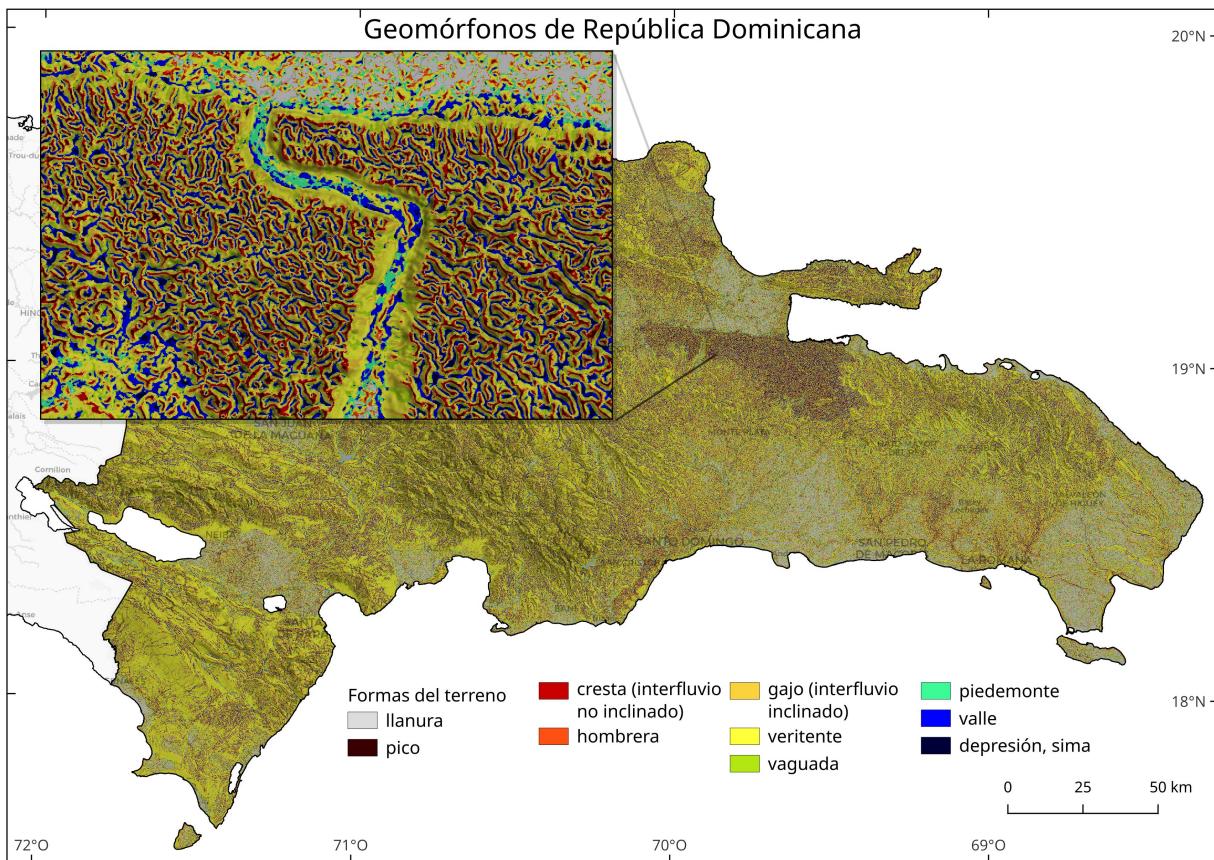


Figura S7: "Geomórfonos" de República Dominicana generados a partir de DEM ALOS PALSAR. En cartela, detalle del cañón del río Payabo

593 kársticos: muchas pérdidas no ocurren a través de una depresión topográficamente visible, pues gran parte de  
 594 la infiltración se produce a través de fracturas en la roca, pasando al endokarst y a la zona vadosa de manera  
 595 "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/los-palsar-dem-rd/dem/' \
#   --dem=dem_tallado.tif -o=geomorfones.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=geomorfones search=25
echo "r.geomorphon finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.geomorphon" USUARIO@MAIL
## real 33m16.508s #MUY LENTO

# Extraer depresiones desde geomorfones
r.mapcalc --overwrite \
  expression="`depresiones_geomorfones' = if(geomorfones == 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

# Importa 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

```

## 596 Suplemento metodológico para la subsección “Procesamiento de hidrología computacional”

- 597 Las técnicas de hidrología computacional han experimentado una considerable transformación desde su origen  
 598 en el siglo pasado hasta la actualidad, un proceso evolutivo al que han contribuido múltiples entidades  
 599 y personas de manera directa (Ehlschlaeger, 1989; Freeman, 1991; Holmgren, 1994; Larson et al., 1991;  
 600 McCool et al., 1987; Metz et al., 2011; Moore et al., 1991; Quinn et al., 1991; Weltz et al., 1988). De manera  
 601 particular, en las últimas dos décadas, se han realizado avances que han expandido el alcance y profundidad  
 602 de la hidrología computacional como disciplina, abriendo nuevas fronteras de conocimiento y posibilitando  
 603 abordajes más sofisticados y detallados de los fenómenos hídricos. En este proceso, GRASS GIS ha jugado  
 604 un papel fundamental, pues no solo ha mantenido activo calendario de lanzamiento de versiones, sino que  
 605 también ha ampliado, gracias a comunidad, el número de herramientas de forma significativa.
- 606 Para realizar análisis de cuencas y redes de drenaje en GRASS GIS, el complemento por excelencia es  
 607 `r.watershed` (GRASS Development Team, 2022d), el cual ofrece la posibilidad de crear mapas de acumulación  
 608 de flujo usando algoritmos avanzados, y facilita también la tarea de extraer *talwegs* y redes de drenaje, y  
 609 delimitar cuencas. Alternativamente, en los casos en los que existe especial interés por el análisis de redes  
 610 de drenaje y la jerarquía hidrográfica, se utiliza la familia de complementos `r.stream*` (Jasiewicz y Metz, 2011).  
 611 Dentro de esta familia se encuentran `r.stream.extract` para generar la red, `r.stream.order` para calcular  
 612 su jerarquía (requiere de los subproductos generados para la herramienta anterior), y `r.stream.basins` para  
 613 crear cuencas hidrográficas en función de la jerarquía. En este sentido, debemos elegir apropiadamente entre  
 614 `r.watershed` o la familia `r.stream*` según nuestras necesidades y objetivos, o usar ambos si nos interesan  
 615 resultados combinados, pero tomando las debidas precauciones.
- 616 Ambos complementos necesitan de dos mapas derivados para generar productos hidrológicos, los cuales  
 617 pueden ser generados por ellos mismos; estos son el mapa de la red propiamente (`stream_rast`), y el de  
 618 dirección de drenaje (`direction`). En este sentido, debe evitarse combinar mapas generados por algoritmos  
 619 distintos para mantener la consistencia (por ejemplo, se desaconseja generar `stream_ras` con `r.watershed`  
 620 y `direction` con `r.stream*`, y viceversa), por lo que se recomienda generar ambos mapas por medio del  
 621 mismo algoritmo.
- 622 Considerando que nuestro objetivo principal es la jerarquía de red, podíamos iniciar con `r.stream.extract`  
 623 para generar los insumos para `r.stream.order`. Pero dado que este último requiere el mapa de acumulación  
 624 flujo, el cual sólo es producido por `r.watershed`, generamos primero este mapa. Por lo tanto, sólo usamos  
 625 `r.watershed` para obtener el mapa de acumulación que necesitamos en la aplicación de la familia `r.stream.*`.

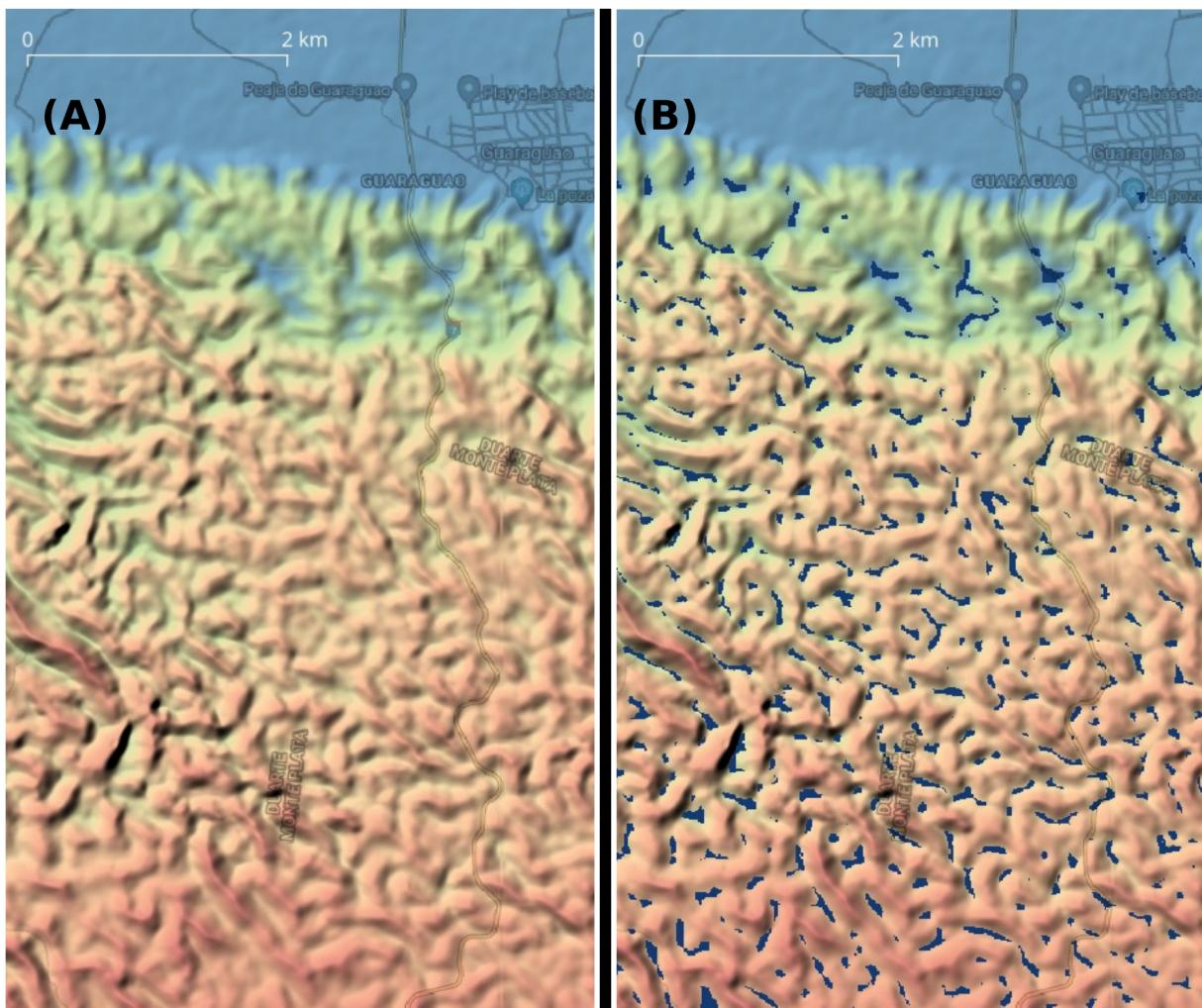


Figura S8: DEM ALOS PALSAR representado como mapa hipsométrico (rojo y marrón representan terreno elevado, verde y azul claro terreno bajo) sobre relieve sombreado, mostrando el área de Guaraguao, Los Haitises, al sur del río Yuna (noroeste de República Dominicana). (A) sin mostrar depresiones, (B) mostrando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

626 Previo al inicio de los análisis hidrológicos, aplicamos una máscara ajustada a la línea de costa y los límites  
 627 fronterizos del país para evitar que las redes extraídas se extiendan al mar, y creamos una zona de influencia  
 628 en el límite fronterizo para permitir la salida y entrada de flujo a través de este. Posteriormente, extrajimos  
 629 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 (EJECUTAR SÓLO SI ES ESTRICAMENTE NECESARIO, PUES Tarda MUCHO)
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 \
# El umbral 180 se usó en la extracción de una red de muestra, como forma de
```

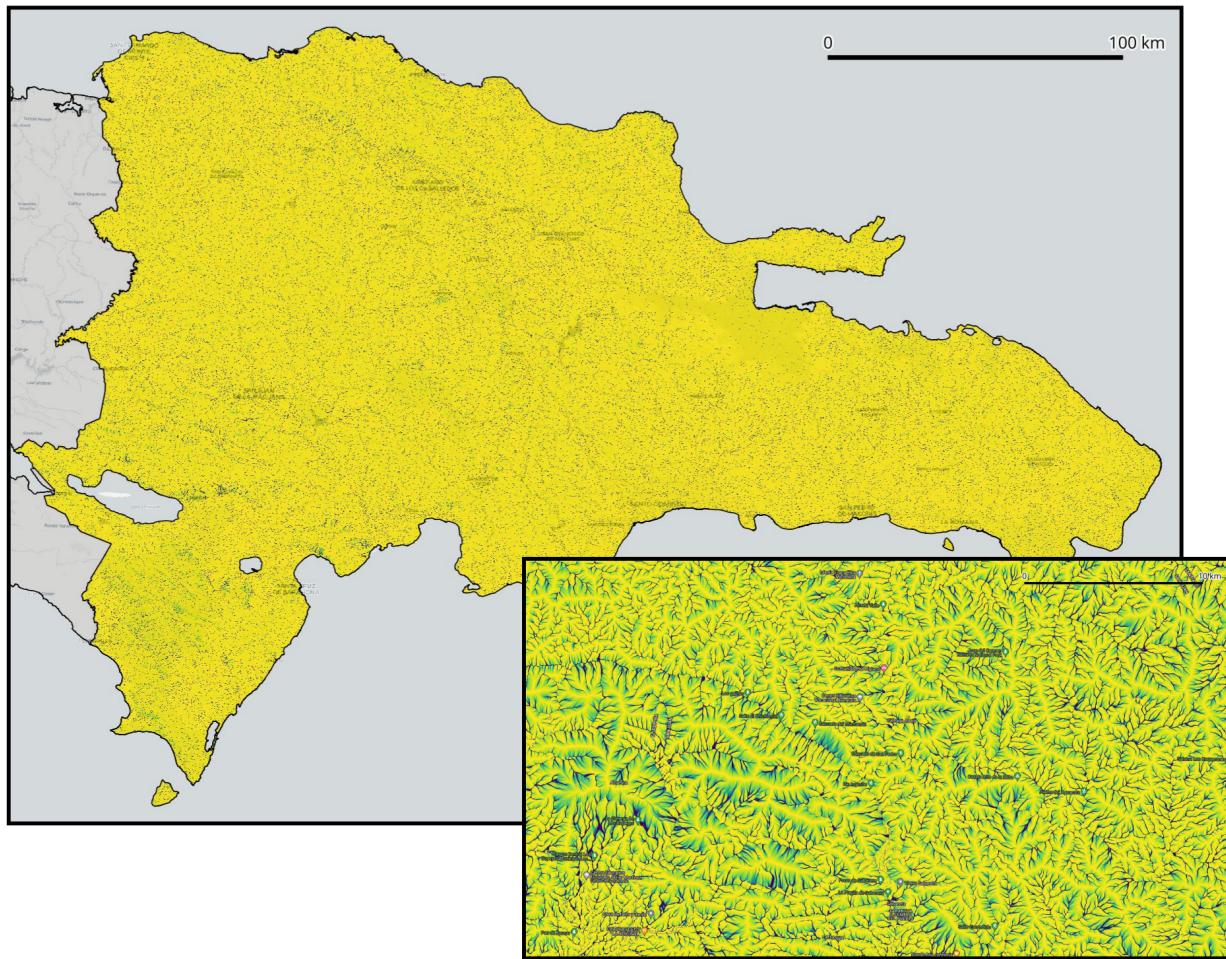


Figura S9: Mapa de acumulación de flujo generado con ‘r.watershed’. En cartela, detalle del mapa en la cuenca del río Yaque del Sur.

```

# previsualizar una hidrografía inicial y no como red definitiva.
# Otras opciones posibles del addon son las siguientes (útiles en otras aplicaciones):
# 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 \
memory=32000
echo "r.watershed finalizado" | mail -s "Mensaje sobre r.watershed" USUARIO@MAIL
## real 9m47.041s

```

- 630 Usando como insumos el DEM y el mapa de acumulación producido por **r.watershed**, obtuvimos la red  
 631 hidrográfica utilizando **r.stream.extract**. Esta etapa requirió la evaluación de umbrales de acumulación  
 632 óptimos a través de inspección visual. El umbral de acumulación es un área de debate en hidrología  
 633 computacional. Nos enfocamos en la evaluación de criterios para la extracción de *talwegs* en un sentido amplio,  
 634 sin considerarlos como cursos fluviales permanentes. Reconocemos que la determinación de la permanencia  
 635 fluvial requeriría un análisis detallado de las características individuales de cada cuenca, incluyendo aspectos  
 636 como la pendiente, tamaño, litología y clima.  
 637 Siguiendo las mejores prácticas, realizamos diversas ejecuciones del complemento **r.stream.extract** usando  
 638 varios umbrales para identificar la red hidrográfica más adecuada en nuestra área de interés (Freeman,  
 639 1991; Jasiewicz y Metz, 2011; Marchesini et al., 2021). Para seleccionar un umbral de acumulación óptimo,

640 consideramos cuatro criterios: consistencia con estudios similares, suficiente densidad de red, evitar una  
 641 generalización excesiva de la red, y prevenir una red demasiado densa que incluya áreas sin características  
 642 hidrológicas mínimas. Dado que nuestro DEM tiene una resolución espacial de 12.5 m, examinamos diferentes  
 643 umbrales para obtener una red hidrográfica adecuada. En `r.stream.extract`, optamos por los umbrales de  
 644 acumulación de 180, 540 y 900 celdas, equivalentes a 3, 8 y 14 hectáreas de superficie, respectivamente. Estos  
 645 umbrales están en línea con los utilizados en estudios que consultamos, donde se evaluaron áreas propensas a  
 646 inundaciones y cuencas de captación (Freeman, 1991; Marchesini et al., 2021).

647 El código necesario para generar las distintas redes evaluadas lo implementamos mediante un bucle `for` en  
 648 Bash para mayor eficiencia y consistencia en el procesamiento. Hicimos que el bucle iterara automáticamente  
 649 sobre los tres umbrales de acumulación, usando los valores de umbral como iterador (`i={180..900..360}`,  
 650 debe leerse como “itera desde 180 a 900 en incrementos de 360 enteros”, resultando en los valores 180, 540 y  
 651 900), el cual pasamos como argumento del parámetro `threshold`. Finalmente, para cada red generada con  
 652 los distintos umbrales, calculamos la longitud de cursos fluviales, actualizamos la base de datos de GRASS  
 653 GIS y generamos un archivo de texto resumen que posteriormente importamos a R para obtener estadísticos  
 654 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 $i ...\\n"; \
  time r.stream.extract --overwrite elevation=dem_tallado accumulation=rwshed_acum \
    depression=depresiones_todas threshold=$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
# 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
```

655 Evaluamos los resultados y recopilamos los estadísticos esenciales de cada red formada con los distintos  
 656 umbrales. Para los umbrales de 180, 540 y 900 celdas, se obtuvieron **419646, 192453 y 130244 segmentos**  
 657 correspondientemente, acumulando **138444, 98213 y 82081 kilómetros** de longitud en cada caso. Para  
 658 cada una de las redes, evaluamos el grado de alineación con nuestros criterios de selección de la red óptima,  
 659 tras lo cual elegimos la red generada con el umbral de acumulación de 540 celdas. Sin embargo, mantuvimos  
 660 las restantes en la base de datos y les aplicamos todos los subsiguientes algoritmos de análisis de hidrología  
 661 computacional, hasta alcanzar los resultados finales.

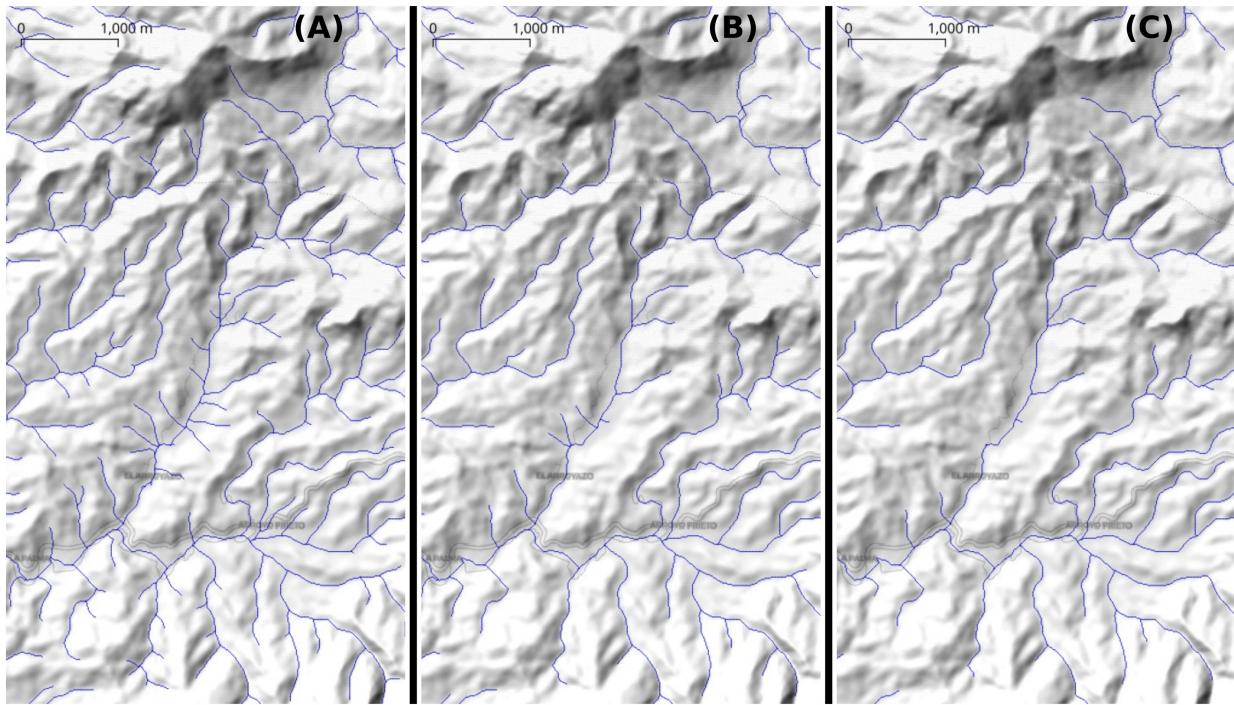


Figura S10: Red de drenaje extraída para tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. La imagen de fondo es un relieve sombreado a partir de DEM ALOS PALSAR, mostrando el área de El Arroyazo en la reserva científica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

662 Posteriormente, calculamos el orden jerárquico de la red hidrográfica, proceso que repetimos para cada uno  
 663 de los umbrales de acumulación que definimos previamente, es decir, 180, 540 y 900 celdas. Al igual que  
 664 en casos anteriores, utilizamos un bucle en Bash para iterar automáticamente sobre los tres umbrales de  
 665 acumulación; en este caso, los valores del índice se correspondían con los sufijos de los mapas de entrada (\_\$i).  
 666 El núcleo del bucle, en este caso, contiene la ejecución del complemento `r.stream.order` de GRASS GIS.  
 667 Este complemento se invoca con una serie de argumentos que especifican los mapas de entrada y salida que  
 668 se deben usar en el cálculo. De manera específica, le proporcionamos el mapa de `talweds` o cursos (parámetro  
 669 `stream_rast`), el mapa de dirección de drenaje (`direction`), el mapa de elevación (`elevation`), y el mapa  
 670 de acumulación (`accumulation`), todos correspondientes al umbral de acumulación que está siendo procesado  
 671 en cada iteración. Adicionalmente, especificamos los nombres de los mapas de salida que contienen el orden  
 672 de red según los métodos de Strahler y Horton (argumentos `strahler` y `horton`) (Horton, 1945; Strahler,  
 673 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 $i ... \n"; \
    time r.stream.order --overwrite stream_rast=rstream_talweds_umbral_$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
```

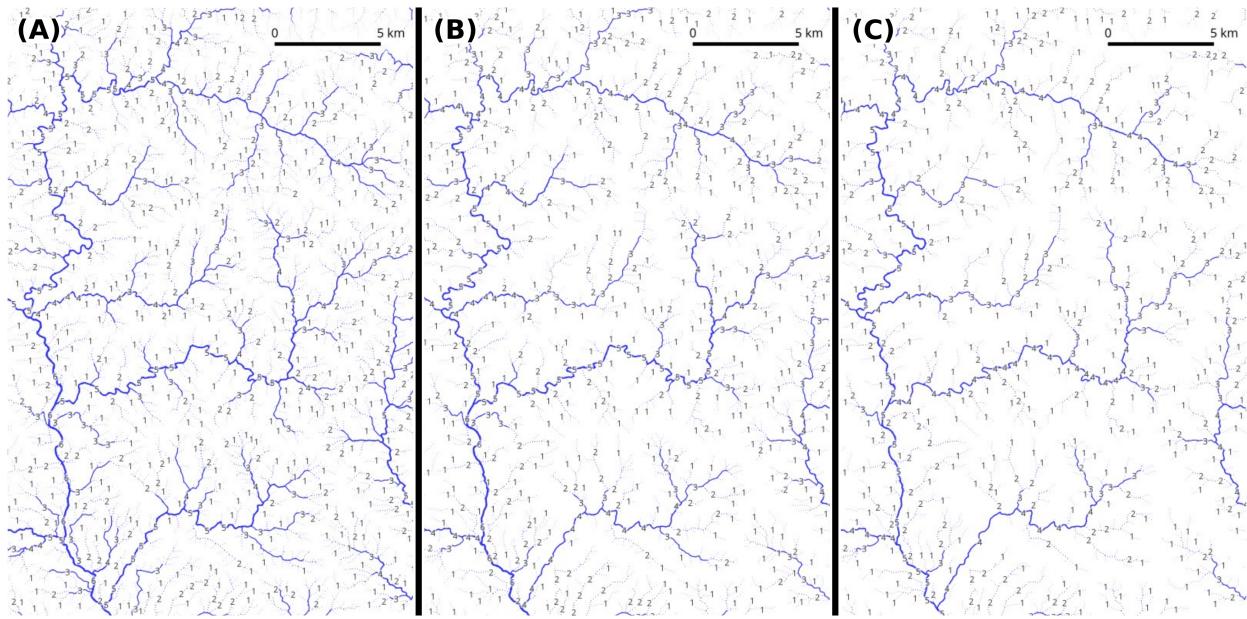


Figura S11: Orden de red de Strahler para redes de drenaje generadas a partir de tres umbrales de acumulación: (A) 180 celdas, equivalente a 3 ha; (B) 540 celdas, equivalente a 8 ha; (C) 900 celdas, equivalente a 14 ha. El área mostrada corresponde al río San Juan, afluente del río Yaque del Sur (vertiente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

```
## 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=rushed_acum stream_vect=order.todos \
#     topo=topologia_orden memory=32000
# echo "Job finished" | mail -s "Job finished" USUARIO@MAIL
## real
```

674 A continuación, delimitamos cuencas y subcuencas según la jerarquía de red, con independencia de si tratara  
 675 de cuencas tributarias o no, para lo cual usamos el complemento `r.stream.basins` especificando la opción  
 676 (`flag`) `-c`, que utiliza una secuencia única de categorías (en nuestro caso, órdenes) para delimitar las cuencas  
 677 en lugar de flujos de entrada. En este caso, construimos un bucle `for` doble, anidando el orden de red dentro  
 678 del umbral de acumulación. Así, para cada uno de los mapas de redes hidrográficas segúin los tres umbrales  
 679 de acumulación, delimitamos las cuencas de cada uno de los órdenes de Strahler disponibles. Al utilizar el  
 680 criterio orden de red, las unidades delimitadas por este procedimiento incluyen tanto cuencas completas como  
 681 subcuencas (tributarias), por lo que la mayoría contiene redes de drenaje tributarias (ríos que desembocan en  
 682 otros ríos).

```
# Delimitar cuencas según jerarquía
# En bucle
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 $j...\n"; \
    time r.stream.basins -c --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$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;
```

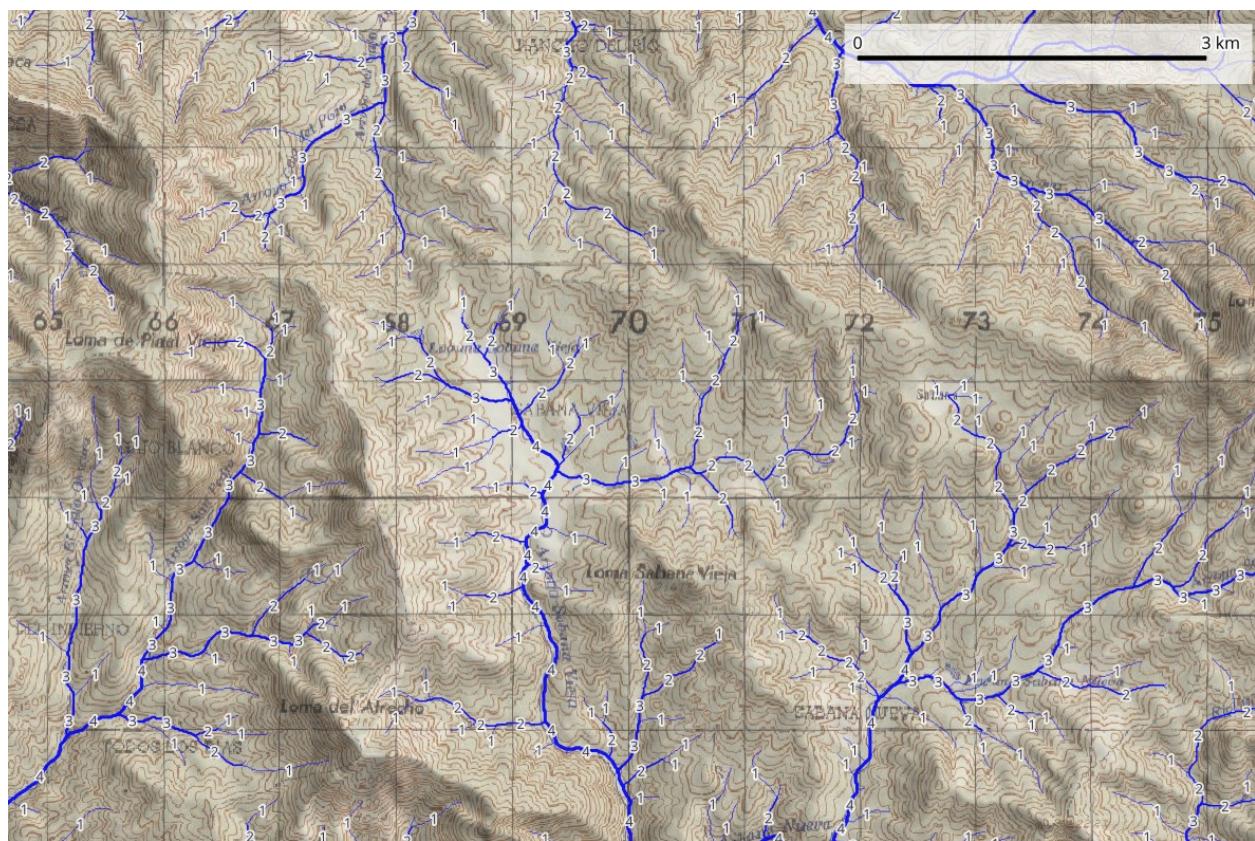


Figura S12: Orden de red de Strahler en el área del pico de la Viuda y Sabana Vieja, provincia San Juan (vertiente sur de la cordillera Central de República Dominicana). Esta red fue generada usando un umbral de acumulación de 180 celdas, equivalente a 3 ha. De fondo, mapa topográfico nacional escala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

**done**

**## real ~ 0m40s repetido tantas veces como órdenes para cada umbral de acumulación**

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

```
# Delimitar cuencas terminales
# En bucle
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 $j...\n"; \
      time r.stream.basins -lc --overwrite direction=rstream_direccion_umbral_$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 ~ 0m40s repetido tantas veces como órdenes para cada umbral de acumulación
```

- 690 Finalmente, convertimos las cuencas a modelo de datos vectorial, pero para evitar agrandar la base de datos  
 691 innecesariamente, elegimos sólo las cuencas generadas para el umbral de 540 celdas. Los vectoriales resultantes  
 692 nos permitieron un mejor manejo de los datos para análisis y representación de la cuencas. Describimos el  
 693 procedimiento detallado a continuación.
- 694 Comenzamos la vectorización ejecutando un bucle para convertir cada capa ráster de cuencas terminales  
 695 correspondiente a cada orden de red (desde 1 a 8) en un mapa vectorial de tipo área. Para realizar esta  
 696 conversión, utilizamos el complemento `r.to.vect` de GRASS GIS, añadiendo también una nueva columna  
 697 llamada `strahler` a la tabla de atributos de cada capa vectorial, que luego actualizamos con el valor del orden  
 698 de red Strahler correspondiente. Después de procesar las cuencas de cada orden, fusionamos todas las capas  
 699 vectoriales en una sola utilizando el complemento `v.patch`. Esto produjo una única capa vectorial conteniendo  
 700 información sobre todas las cuencas terminales para todos los órdenes Strahler. Es importante aclarar que sólo  
 701 fueron propiamente clasificadas como polígonos con de orden de red, aquellas las áreas del ráster que contaban  
 702 con categorías asignadas (e.g. píxeles con valor 1 a 8), es decir, aquellas a las que el algoritmo `r.stream.basins`  
 703 asignó un orden de red debidamente. Las áreas que formaban el fondo (e.g. píxeles con valor cero), que  
 704 corresponden a espacios con drenaje hacia depresiones sin pertenencia a jerarquía alguna, conforman la capa  
 705 “0” del mapa vectorial generado (`rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned 0`).  
 706 Por esta razón, el mapa vectorial de cuencas generado, presenta espacios vacíos; si hiciera falta recuperar  
 707 dichos espacios, bastaría con cargar la referida capa “0”, tomando en consideración que sus elementos no  
 708 cuentan con atributos aprovechables.
- 709 Luego, limpiamos y preparamos los datos para el análisis. Primero, corregimos la topología y actualizamos el  
 710 área de cada cuenca usando el complemento `v.clean`. Eliminamos las áreas inferiores a  $4000 \text{ m}^2$  (cuencas  
 711 espurias) para mejorar la calidad de los datos. Posteriormente, eliminamos los registros con un valor de área  
 712 nulo (artefactos). Estas etapas de limpieza y preparación son críticas para garantizar la precisión y relevancia  
 713 de nuestros resultados.
- 714 Finalmente, seleccionamos las filas válidas—las que tenían un valor de categoría distinto de -1—de la tabla  
 715 de atributos de nuestra capa vectorial final, y exportamos estos datos a un archivo de texto. Este archivo de  
 716 texto contiene estadísticas del área para cada cuenca terminal según orden Strahler, lo cual nos proporcionó  
 717 información valiosa para nuestro análisis posterior.

```
# Cuencas y subcuenca según orden
for i in `echo {1..8..1}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
  time r.to.vect --overwrite input=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
    output=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i type=area; \
  v.db.addcolumn rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
    columns="strahler int"; \
  v.db.update rstream_cuencas_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_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
  output=foo \
  tool=rmarea threshold=4000
v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
  map=foo
v.db.droprow --overwrite \
  input=foo \
  output=rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i where="area IS NULL"
g.remove -f type=vector \
  name=foo
done
# Tiempos uso de CPU, órdenes 1 a 8
# real 2m0.180s
# real 0m49.778s
# real 0m32.943s
```

```

# real 0m28.137s
# real 0m28.078s
# real 0m26.906s
# real 0m25.886s
# real 0m25.624s
# 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_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i \
    output=foo \
    where="area <= 6e4";
    g.rename --overwrite \
        vector=foo,rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_$i; \
    g.remove -f type=vector name=foo; \
done

# Cuencas terminales
for i in `echo {1..8..1}`; \
do echo -e "\nTRABAJANDO EL ORDEN $i...\n"; \
    r.to.vect --overwrite input=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
    output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i type=area; \
    v.db.addcolumn rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
    columns="strahler int"; \
    v.db.update rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_orden_$i \
    col=strahler value=$i where="strahler IS NULL"; \
done
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
# Calcular estadísticos, y pasar a archivo
## Preparación de fuentes (corrección de topología >
##                                     actualización de área >
##                                     eliminar registros)
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
v.to.db --overwrite option=area type=centroid columns=area \
    map=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2 where="area IS NULL"
g.rename --overwrite \
    vector=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2, \
    rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
# Excluir cuencas strahler>=4 y area<=1e6
v.db.droprow --overwrite rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned \
    output=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2 \
    where="strahler >= 4 and area <= 1e6"
g.rename --overwrite \
    vector=rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned_2, \
    rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned
# 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' a GeoPackage
v.out.ogr --overwrite \
    input=rstream_orden_de_red_umbral_540 \
    output=gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540.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' a Shapefile
ogr2ogr -f "ESRI Shapefile" \
    gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540.shp \
    gpkg-shp/rstream_orden_de_red_umbral_540.gpkg
## Exportar el mapa 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned'
## a Shapefile
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)
rstream_cuencas_540_por_orden <- stats_rstream_cuencas_540 %>%
  rename(`Orden de red (Strahler)` = strahler) %>%
  group_by(`Orden de red (Strahler)`) %>%
  summarise(`Número de cuencas` = n(),
            `Área promedio` = mean(area),
            `Área total` = sum(area))

```

#### 718 4.1. Suplemento para la sección “Resultados”

719 Realizamos análisis estadísticos de las cuencas terminales. Se necesita descargar el comprimido con los datos  
 720 del estudio, colocar el directorio `gpkg-shp` en el directorio raíz de este repo. Como medida de seguridad,  
 721 excluimos cuencas con orden de red cuatro o mayor y con área menor  $1^2$ . Posteriormente, generamos un  
 722 nuevo objeto de cuencas de orden cuatro o mayor para análisis focalizados, así como objetos de cuencas y  
 723 subcuencas de todos los órdenes, y obtuvimos estadísticos básicos (la asimetría y la curtosis son  $G_1$  y  $G_2$ ,  
 724 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')

```

```

725 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_terminal_umbral_540_todos_cleaned' from data source '/media/
726 ##   using driver 'GPKG'
727 ## Simple feature collection with 6935 features and 5 fields
728 ## Geometry type: POLYGON
729 ## Dimension: XY
730 ## Bounding box: xmin: 181416 ymin: 1941059 xmax: 571258.9 ymax: 2205188
731 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N

cuencas4mas <- cuencas[cuencas$strahler >= 4, ]
# Cuencas y subcuenca
system.time(
  cuencas_subcuenca <- sapply(as.character(1:8), function(x) {
    st_read(paste0('gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_', x, '.gpkg'))
  }, USE.NAMES = T, simplify = F)
)

732 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_1' from data source
733 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_1.gpk
734 ##   using driver 'GPKG'
735 ## Simple feature collection with 99783 features and 5 fields
736 ## Geometry type: POLYGON
737 ## Dimension: XY
738 ## Bounding box: xmin: 182028 ymin: 1941059 xmax: 571258.9 ymax: 2205188
739 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
740 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_2' from data source
741 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_2.gpk
742 ##   using driver 'GPKG'
743 ## Simple feature collection with 22746 features and 5 fields
744 ## Geometry type: POLYGON
745 ## Dimension: XY
746 ## Bounding box: xmin: 181615.8 ymin: 1941121 xmax: 571258.9 ymax: 2205113
747 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
748 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_3' from data source
749 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_3.gpk
750 ##   using driver 'GPKG'
751 ## Simple feature collection with 4930 features and 5 fields
752 ## Geometry type: POLYGON
753 ## Dimension: XY
754 ## Bounding box: xmin: 185425.3 ymin: 1942220 xmax: 571258.9 ymax: 2205138
755 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
756 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_4' from data source
757 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_4.gpk
758 ##   using driver 'GPKG'
759 ## Simple feature collection with 1048 features and 5 fields
760 ## Geometry type: POLYGON
761 ## Dimension: XY
762 ## Bounding box: xmin: 181416 ymin: 1952287 xmax: 556545.5 ymax: 2203165
763 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
764 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_5' from data source
765 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_5.gpk
766 ##   using driver 'GPKG'
767 ## Simple feature collection with 220 features and 5 fields
768 ## Geometry type: POLYGON
769 ## Dimension: XY
770 ## Bounding box: xmin: 196179.3 ymin: 1969074 xmax: 543967.9 ymax: 2201653
771 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
772 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_6' from data source
773 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_6.gpk
774 ##   using driver 'GPKG'

```

```

775 ## Simple feature collection with 49 features and 5 fields
776 ## Geometry type: POLYGON
777 ## Dimension: XY
778 ## Bounding box: xmin: 204060.6 ymin: 1995815 xmax: 543967.9 ymax: 2201653
779 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
780 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_7' from data source
781 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_7.gpkg'
782 ##   using driver 'GPKG'
783 ## Simple feature collection with 10 features and 5 fields
784 ## Geometry type: POLYGON
785 ## Dimension: XY
786 ## Bounding box: xmin: 195030.2 ymin: 2038932 xmax: 480205.6 ymax: 2198806
787 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N
788 ## Reading layer 'rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_8' from data source
789 ##   '/media/jose/datos/los-palsar-dem-rd/dem/gpkg-shp/rstream_cuencas_strahler_umbral_540_orden_8.gpkg'
790 ##   using driver 'GPKG'
791 ## Simple feature collection with 4 features and 5 fields
792 ## Geometry type: POLYGON
793 ## Dimension: XY
794 ## Bounding box: xmin: 195030.2 ymin: 2014288 xmax: 454888.1 ymax: 2162122
795 ## Projected CRS: WGS 84 / UTM zone 19N

796 ##     user    system elapsed
797 ##     1.547    0.300   1.850

cuencas_sub_areas_ordenes <- map(cuencas_subcuenca,
~.[`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 %>% 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`)
    ) +
  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) +
  theme_bw() +
  theme(legend.position = 'none', text = element_text(size = 18))
png('figuras/cuencas-subcuenca-areas-ordenes-boxplot.png',
  width = 3500, height = 2400, res = 450)
cuencas_sub_areas_ordenes_p
dev.off()

798 ## pdf
799 ## 2

```

800 Obtuvimos los mapas de cuencas y subcuencas para cada orden. Primero, extrajimos los límites del país hacia  
 801 el directorio gpkg-shp para disponer de un contexto en los mapas generados a continuación.

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

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

802 Informe de la sesión de R

```
sessionInfo()

803 ## R version 4.3.0 (2023-04-21)
804 ## Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)
805 ## Running under: Ubuntu 20.04.3 LTS
806 ##
807 ## Matrix products: default
808 ## BLAS:    /usr/lib/x86_64-linux-gnublas/libblas.so.3.9.0
809 ## LAPACK:  /usr/lib/x86_64-linux-gnulapack/liblapack.so.3.9.0
810 ##
811 ## locale:
```

```

812 ## [1] LC_CTYPE=es_DO.UTF-8      LC_NUMERIC=C
813 ## [3] LC_TIME=es_DO.UTF-8       LC_COLLATE=es_DO.UTF-8
814 ## [5] LC_MONETARY=es_DO.UTF-8   LC_MESSAGES=es_DO.UTF-8
815 ## [7] LC_PAPER=es_DO.UTF-8     LC_NAME=C
816 ## [9] LC_ADDRESS=C             LC_TELEPHONE=C
817 ## [11] LC_MEASUREMENT=es_DO.UTF-8 LC_IDENTIFICATION=C
818 ##
819 ## time zone: America/Santo_Domingo
820 ## tzcode source: system (glibc)
821 ##
822 ## attached base packages:
823 ## [1] stats      graphics   grDevices utils      datasets  methods   base
824 ##
825 ## other attached packages:
826 ## [1] tmap_3.3-3    scales_1.2.1    e1071_1.7-13
827 ## [4] gdalUtilities_1.2.4 lubridate_1.9.2  forcats_1.0.0
828 ## [7] stringr_1.5.0   dplyr_1.1.2    purrr_1.0.1
829 ## [10] readr_2.1.4    tidyverse_2.0.0 kableExtra_1.3.4
830 ## [13] ggplot2_3.4.2   tidyverse_2.0.0
831 ## [16] sf_1.0-12      raster_3.6-20   sp_1.6-0
832 ## [19] psych_2.3.3
833 ##
834 ## loaded via a namespace (and not attached):
835 ## [1] DBI_1.1.3      mnormt_2.1.1    tmaptools_3.1-1 s2_1.1.4
836 ## [5] conflicted_1.2.0 rlang_1.1.1      magrittr_2.0.3   compiler_4.3.0
837 ## [9] png_0.1-8      systemfonts_1.0.4 vctrs_0.6.2     rvest_1.0.3
838 ## [13] pkgconfig_2.0.3 wk_0.7.3       crayon_1.5.2    fastmap_1.1.1
839 ## [17] lwgeom_0.2-13 leafem_0.2.0   labeling_0.4.2  utf8_1.2.3
840 ## [21] rmarkdown_2.21 tzdb_0.4.0     bit_4.0.5      xfun_0.39
841 ## [25] cachem_1.0.8 jsonlite_1.8.4 terra_1.7-29   parallel_4.3.0
842 ## [29] R6_2.5.1      stringi_1.7.12 RColorBrewer_1.1-3 reticulate_1.30
843 ## [33] stars_0.6-2   Rcpp_1.0.10     knitr_1.42     base64enc_0.1-3
844 ## [37] Matrix_1.4-0   timechange_0.2.0 tidyselect_1.2.0 rstudioapi_0.14
845 ## [41] dichromat_2.0-0.1 abind_1.4-5    yaml_2.3.7     codetools_0.2-18
846 ## [45] lattice_0.20-45 leafsync_0.1.0 withr_2.5.0     evaluate_0.21
847 ## [49] units_0.8-2    proxy_0.4-27   xml2_1.3.4    pillar_1.9.0
848 ## [53] KernSmooth_2.23-20 rticles_0.25  generics_0.1.3 vroom_1.6.3
849 ## [57] hms_1.1.3      munsell_0.5.0  class_7.3-20  glue_1.6.2
850 ## [61] tools_4.3.0     webshot_0.5.4  XML_3.99-0.14 grid_4.3.0
851 ## [65] crosstalk_1.2.0 colorspace_2.1-0 nlme_3.1-155 ggspatial_1.1.8
852 ## [69] cli_3.6.1      fansi_1.0.4    viridisLite_0.4.2 svglite_2.1.1
853 ## [73] gtable_0.3.3   digest_0.6.31  classInt_0.4-9 htmlwidgets_1.6.2
854 ## [77] farver_2.1.1   memoise_2.0.1  htmltools_0.5.5 lifecycle_1.0.3
855 ## [81] leaflet_2.1.2   httr_1.4.6    bit64_4.0.5

```

## 856 Referencias

- 857 Anderson, R. S. y Anderson, S. P. (2010). *Geomorphology: the mechanics and chemistry of landscapes*.  
858 Cambridge University Press.
- 859 ASF DAAC. (2014). *PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res*. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- 860 Aziz, K. M. A. y Rashwan, K. S. (2022). Comparison of different resolutions of six free online DEMs with  
861 GPS elevation data on a new 6th of October City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1585.  
862 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10845-5>
- 863 Burn, D. H. (1997). Hydrological information for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*,  
864 42(4), 481-492. <https://doi.org/10.1080/02626669709492048>
- 865 Charlton, R. (2010). *Fundamentals of fluvial geomorphology* (Repr). Routledge.
- 866 CIDIAT y INDRHI. (1992). *Control de Inundaciones en la cuenca del Río Yaque del Sur*. Instituto Nacional  
867 de Recursos Hidráulicos (INDRHI).

- 869 Ehlschlaeger, C. R. (1989). *Using the A ^ T search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation*  
 870 data. 275281.
- 871 Foucault, A. y Raoult, J. F. (1985). *Diccionario de Geología*. MASSON. <https://books.google.com.do/books?id=x5FDPQAACAAJ>
- 872 Freeman, T. G. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers &*  
 874 *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)
- 875 GADM. (2022). *GADM*. Available online: <https://gadm.org/index.html> (accessed on abril, 2023).
- 876 García, J. H. G. y Ojeda, A. O. (2011). Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas  
 877 de información geográfica (SIG). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56, 373-396.
- 878 GDAL/OGR contributors. (2022). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Open Source  
 879 Geospatial Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884351>
- 880 Google; Airbus, CNES; Airbus, Landsat; Copernicus; Maxar Technologies; U.S. Geological Survey. (2023).  
 881 *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/>
- 882 GRASS Development Team. (2022a). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software*,  
 883 Version 8.0.2. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 884 GRASS Development Team. (2022b). *r.carve*. Generates stream channels. Takes vector stream data, transforms  
 885 it to raster and subtracts depth from the output DEM. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.carve.html>
- 886 GRASS Development Team. (2022c). *r.mapcalc* - Raster map calculator. *GRASS GIS manual*. <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.mapcalc.html>
- 887 GRASS Development Team. (2022d). *r.watershed* - Calculates hydrological parameters and RUSLE factors.  
 888 <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/r.watershed.html>
- 889 GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software*,  
 890 Version 8.2.0. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org>
- 891 Gutiérrez Elorza, M. (2009). *Geomorfología* (Última reimpr). Pearson-Prentice Hall.
- 892 Halcrow-COR Ing. S.A. (2002). *Estudio de Vulnerabilidad de las Grandes Presas*. Instituto Nacional de  
 893 Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 894 Hernández Huerta, P. P. y Andrés, P.-E. (2002). Estructura del cinturón de pliegues y cabalgamientos de Peralta,  
 895 República Dominicana. *Acta geológica hispánica*, 37(2), 183-205. <https://raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/view/75740>
- 896 Hijmans, R. J. (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- 897 Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An  
 898 empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4), 327-334. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360080405>
- 899 Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach  
 900 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)
- 900 INDRHI. (1996). *Estadísticas del Agua en la República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos  
 901 (INDRHI).
- 902 INDRHI. (2012). *Plan Hidrológico Nacional, República Dominicana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos  
 903 (INDRHI).
- 904 INDRHI. (2019). *Inventario de Estaciones Hidrometeorológicas. Informe Final*. Instituto Nacional de Recursos  
 905 Hidráulicos.
- 906 INDRHI y AQUATER. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase I. Memoria  
 907 de Proyecto, 7 volúmenes*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 908 INDRHI y EPTISA. (2000). *Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana, Fase II*. Instituto  
 909 Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- 910 Instituto Cartográfico Militar (ICM). (1989). *Serie E733 de mapas topográficos escala 1:50,000*. Instituto  
 911 Cartográfico Militar.
- 912 Instituto Geográfico Nacional. (2022). *Medición por Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) de los  
 913 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-picomas-altos-de-las-antillas>.
- 914 Izzo, M., Rosskopf, C. M., Aucelli, P. P. C., Maratea, A., Méndez, R. E., Pérez, C. y Segura, H. (2010). A New  
 915 Climatic Map of the Dominican Republic Based on the Thornthwaite Classification. *Physical Geography*,  
 916 31, 455-472.
- 917 Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available  
 918 from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.cgiar.org>), 15(25-54), 5.

- 927 Jasiewicz, J. y Metz, M. (2011). A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks.  
 928     *Computers & Geosciences*, 37(8), 1162-1173. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.03.003>
- 929 Jasiewicz, J. y Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and  
 930 mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- 932 JAXA/METI y ASF DAAC. (2015). *ALOS PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res. Includes*  
 933 *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).
- 935 Joanes, D. N. y Gill, C. A. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the*  
 936 *Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(1), 183-189. [https://doi.org/10.1111/1467-9884.00122](https://doi.org/10.1111/1467-937-9884.00122)
- 938 Larson, M., Shapiro, M. y Tweddle, S. (1991). Performing map calculations on GRASS data: r. mapcalc pro-  
 939 gram tutorial. *US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory.* [https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history\\_docs/mapcalc.pdf](https://grass.osgeo.org/uploads/grass/history_docs/mapcalc.pdf).
- 941 Le, T. D. N. (2019). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types  
 942 of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25,  
 943 739-761.
- 944 Lenderking, H. L., Robinson, S. y Carlson, G. R. (2020). Climate change and food security in Caribbean small  
 945 island developing states: challenges and strategies. *International Journal of Sustainable Development &*  
 946 *World Ecology*, 28, 238-245.
- 947 Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited: The Practice of DEM Stream Burning  
 948 Revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- 949 Lindsay, J. B. (2018). *WhiteboxTools user manual.* Available online: [https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt\\_book/intro.html](https://www.whiteboxgeo.com/manual/wbt_book/intro.html) (accessed on abril, 2023).
- 951 Lindsay, J. B., Francioni, A. y Cockburn, J. M. H. (2019). LiDAR DEM Smoothing and the Preservation of  
 952 Drainage Features. *Remote Sensing*, 11(16), 1926. <https://doi.org/10.3390/rs11161926>
- 953 Lohmann, H. (2016). Comparing vulnerability and adaptive capacity to climate change in individuals of  
 954 coastal Dominican Republic. *Ocean & Coastal Management*, 132, 111-119.
- 955 Mackay, E. A. y Spencer, A. J. (2017). The future of Caribbean tourism: competition and climate change  
 956 implications. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 9, 44-59.
- 957 Marchesini, I., Salvati, P., Rossi, M., Donnini, M., Sterlacchini, S. y Guzzetti, F. (2021). Data-driven flood  
 958 hazard zonation of Italy. *Journal of Environmental Management*, 294, 112986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112986>
- 960 Martínez-Batlle, J.-R. (2019). *Drainage rearrangement as a driver of geomorphological evolution during the*  
 961 *Upper Pleistocene in a small tropical basin.* <https://doi.org/10.31223/OSF.IO/PFZVQ>
- 962 Martínez-Batlle, J. R. (2012). *Sierra de Bahoruco Occidental, República Dominicana: estudio biogeomorfológico*  
 963 *y estado de conservación de su parque nacional* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla; Available online:  
 964 <http://hdl.handle.net/11441/15199> (accedido en Julio, 2023)]. <http://hdl.handle.net/11441/15199>
- 966 Martínez-Batlle, J.-R. (2019). Drainage Rearrangement as a Driver of Geomorphological Evolution During  
 967 the Upper Pleistocene in a Small Tropical Basin. *Journal of Geography and Geology*, 11(2), 1. <https://doi.org/10.5539/jgg.v11n2p1>
- 969 Martínez-Batlle, J.-R. y Izzo-Gioiosa, M. (2023). *Datos del estudio "Generación de red hidrográfica densa de*  
 970 *República Dominicana a partir de modelo digital de elevaciones de resolución media".* <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8146391>
- 972 McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. y Meyer, L. D. (1987). Revised Slope Steepness  
 973 Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396. <https://doi.org/10.13031/2013.30576>
- 975 Metz, M., Mitasova, H. y Harmon, R. S. (2011). Efficient extraction of drainage networks from massive,  
 976 radar-based elevation models with least cost path search. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2),  
 977 667-678. <https://doi.org/10.5194/hess-15-667-2011>
- 978 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of*  
 979 *Geophysics*, 47(2), RG2001. <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- 980 Mishra, A. K. y Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of*  
 981 *Hydrology*, 380(3-4), 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
- 982 Mollat, H., Wagner, B. M., Cepek, P. y Weiss, W. (2004). *Mapa Geológico de la República Dominicana*  
 983 *1 : 250.000. Texto Explicativo.* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

- 984 Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological,  
 985 geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- 986 NASA JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second [Data set]*. <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMGL3.003>
- 987 NASA LP DAAC. (2000). *SRTM 1 Arc-Second Global*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- 988 National Aeronautics and Space Administration y United States Geological Survey. (2009). *ASTER GDEM*.  
 989 <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- 990 Ngula Niipele, J. y Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in  
 991 semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57-67.  
 992 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- 993 O'Brien, J. (2023). *gdalUtilities: Wrappers for 'GDAL' Utilities Executables*. <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtilities>
- 994 OCHA. (2022). *Humanitarian Data Exchange (OCHA)*. Available online: <https://data.humdata.org/dataset/cod-ab-dom> (accessed on abril, 2023).
- 995 OEA y INDRHI. (1994). *Plan Nacional de Ordenamiento de los Recursos Hídricos (PNORHI)*. Instituto  
 996 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 997 Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2018). *División territorial de República Dominicana*. Available online:  
 998 <https://www.one.gob.do/media/s5gd100n/divisi%C3%B3n-territorial-2020-t.pdf> (accessed on  
 999 abril, 2023).
- 1000 OpenStreetMap contributors. (2017). *Planet dump retrieved from https://planet.osm.org* . Available online:  
 1001 <https://www.openstreetmap.org> (accessed on abril, 2023).
- 1002 Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*,  
 1003 10(1), 439-446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- 1004 Pebesma, E. y Bivand, R. (2023). *Spatial Data Science: With applications in R* (p. 352). Chapman and  
 1005 Hall/CRC. <https://r-spatial.org/book/>
- 1006 Pedraza Gilsanz, J. de. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- 1007 Petrasova, A., Petras, V., Jeziorska, J., White, C. H. C., Reckling, W., Millar, G., Grokhowsky, N., Paulukonis,  
 1008 A., Montgomery, K., Coffer, M., Harmon, B., Cepero, K., Starek, M., Hardin, N. L. E., Paris, P., Russ, E.,  
 1009 Weaver, K., Fogleman, B., Leo, M. di y Stopkova, E. (2011). *GeoInformation Science and Environmental  
 1010 Modeling*. <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/>
- 1011 QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System, Version 3.26.2*. QGIS Association.  
 1012 <https://www.qgis.org>
- 1013 Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. y Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for  
 1014 distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59-79.  
 1015 <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- 1016 R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical  
 1017 Computing. <https://www.R-project.org/>
- 1018 Rodríguez, H. y Febrillet, J. F. (2006). Potencial idrogeológico de la República Dominicana. *Boletín Geológico  
 1019 y Minero*, 117.
- 1020 Roson, R. (2013). A Modeling Framework to Assess the Economic Impact of Climate Change in the Caribbean.  
 1021 *Cepal Review*, 111, 23-36.
- 1022 Saunders, W. (2000). Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. *Hydrologic and  
 1023 Hydraulic Modeling Support. Redlands, CA: ESRI*, 2951.
- 1024 Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Atlas de los Recursos Naturales de la  
 1025 República Dominicana*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- 1026 SERCITEC y INDRHI. (2002). *Control de Inundaciones de la cuenca del Río Yaque del Norte*. Instituto  
 1027 Nacional de Recursos Hídricos (INDRHI).
- 1028 Shapiro, M. y Westervelt, J. (1994). *r.mapcalc: An algebra for GIS and image processing*. US Army Corps of  
 1029 Engineers, Construction Engineering Research Laboratories.
- 1030 Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American  
 1031 Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- 1032 Van Rossum, G. y Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
- 1033 Weltz, M. A., Renard, K. G. y Simanton, J. R. (1988). Revised Universal Soil Loss Equation for Western  
 1034 Rangelands^1. *Estrategias de Clasificación Y Manejo de Vegetación Silvestre Para la Producción de  
 1035 Alimentos en Zonas Áridas*, 150, 104.
- 1036 Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemud, G., Hayes, A.,  
 1037 Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson,  
 1038

- 1042 D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source*  
1043 *Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- 1044 Xie, Y. (2014). knitr: A Comprehensive Tool for Reproducible Research in R. En V. Stodden, F. Leisch, y R.  
1045 D. Peng (Eds.), *Implementing Reproducible Computational Research*. Chapman; Hall/CRC.
- 1046 Xie, Y. (2015). *Dynamic Documents with R and knitr* (2nd ed.). Chapman; Hall/CRC. <https://yihui.org/knitr/>
- 1047 Xie, Y. (2023). *knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R*. <https://yihui.org/g/knitr/>
- 1048 Zhu, H. (2021). *kableExtra: Construct Complex Table with 'kable' and Pipe Syntax*. <https://CRAN.R-project.org/package=kableExtra>
- 1051