

# Características morfométricas de la microcuenca Caña, República Dominicana, aplicando tecnología geoespacial de código abierto.

**Cinthia Amalia Vandepool Candelario** *Estudiante de Geografía mención Recursos Naturales y Ecoturismo, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD)*

---

La morfometría fluvial es de gran importancia para realizar estudios hidrológicos en un contexto de cambio climático con amenazas cada vez más frecuentes de eventos extremos, pero aún en la actualidad pocos países realizan de manera continua análisis de esta índole, en especial en nuestro país que, debido a su condición como isla y su ubicación en la trayectoria de ciclones tropicales, debería de estar especialmente interesado en mitigar el riesgo de grandes inundaciones. A lo largo de este artículo se estará analizando la microcuenca del arroyo caña, perteneciente a la subcuenca del río Macasía ubicada en el extremo suroeste de la República Dominicana, dicha unidad hidrográfica es prácticamente desconocida, ya que no se posee información específica sobre ella en fuentes bibliográficas, por lo que este estudio proporciona algunos datos reales sobre sus aspectos morfométricos, geológicos y cartográficos. Basándose en datos preexistentes y utilizando un MDE se delimitó la cuenca y se analizó la red de drenaje y los perfiles longitudinales e índices de concavidad del curso más largo, de la misma forma se calcularon los parámetros morfométricos de la cuenca, se estudió su posible relación con la litología de la zona y si existían evidencias de un posible fenómeno de reorganizamiento del drenaje.

*Keywords:* morfometría fluvial, modelo digital de elevación, red de drenaje, razón de bifurcación, índice de concavidad

---

## 1 Introducción

A lo largo del último siglo se ha reducido la dificultad para realizar análisis espaciales, gracias a los novedosos avances tecnológicos en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha simplificado el arduo trabajo que suponía llevar a cabo este tipo de análisis, y a pesar de todas las herramientas disponibles, la República Dominicana aún está pasos por detrás de muchos países en especial en lo relacionado con los análisis de geomorfología fluvial, situación lamentable, ya que la isla posee innumerables cursos fluviales permitiéndole ocupar un lugar privilegiado en este siglo, ya que, cada día más países sufren por la escasez de agua dulce potable producto del inadecuado manejo de sus cuencas hidrográficas.

La geomorfología fluvial se encarga de estudiar las relaciones entre los procesos físicos del flujo en canales de lecho móvil, la mecánica del transporte de sedimentos forzado por el flujo y las formas de los canales aluviales creadas por el transporte de sedimentos (Elorza, 2008). Esta ciencia posee un amplio campo de estudio, pero en esta investigación nos centraremos en la “morfometría fluvial” la cual se encarga de analizar los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica, tales como, la red de drenaje, la pendiente, la forma, el orden de la red y demás aspectos físicos. Hasta hace algunos años para analizar los parámetros morfométricos de cualquier sistema fluvial, se requerían una serie de herramientas que hoy en día ya no son enteramente necesarias debido a los números programas que simplifican este arduo trabajo, sin mencionar el tiempo que requería

llevar a cabo estos estudios.

Como se menciona con anterioridad se utilizan algunos indicadores para determinar las características de un sistema fluvial, siendo uno de estos el aspecto general del sistema, el cual se entiende como la forma en la que se distribuyen los cursos de agua, esta forma depende principalmente de la gravedad y la pendiente; diversos autores han establecido métodos tanto cualitativos como cuantitativos para determinar que forma presenta la cuenca, además de que han establecido clasificaciones para denominar las formas similares (ej.: Dendrítica). Cuando nos referimos a la red de drenaje estamos refiriéndonos a la relación entre la longitud total de los cursos fluviales de todos los órdenes y el área de la cuenca, esta variable nos permitirá establecer las características litológicas del área de estudio (Elorza, 2008).

Además, debemos tomar en cuenta, el orden de red de los cursos del sistema, el cual indica el grado de ramificación de la red fluvial; existen distintos métodos para jerarquizar los cursos de una red, pero los dos más conocidos y utilizados son el método de Strahler (1952) y el de Horton (1945), gracias a esta jerarquización se puede entender mejor el comportamiento del sistema de drenaje de la cuenca, además de que se puede obtener la razón de bifurcación descrita por Horton como la relación entre el número de cursos de un orden y número de cursos de orden más alto, esta propiedad es condicionada por la forma que presenta la cuenca, dicho valor debe ser constante de un par de órdenes a otro (Elorza, 2008 Lux Cardona (2016) Ibañez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer (2011)).

Gutierrez-Elorza (2008), sostiene que otro elemento utilizado para estudiar las cuencas hidrográficas es el perfil longitudinal de su curso principal, siendo este la línea obtenida a partir de las diferencias de alturas desde el afloramiento del curso hasta la desembocadura en otro cuerpo de agua, este perfil comúnmente es cóncavo, aunque no todos los ríos lo presentan de una manera clara producto de afloramientos de rocas duras, actividad tectónica reciente o debido a cambios súbitos del caudal (Elorza, 2008). A partir del Índice de Concavidad se observa si la cuenca en cuestión presenta realmente un perfil cóncavo, en caso de no serlo es necesario identificar las posibles causas y determinar si existe evidencia de una posible reorganización de la red de drenaje del sistema fluvial.

A partir del estudio de los parámetros antes mencionados, se pretende determinar si existe alguna relación entre la forma que presenta la red de drenaje con la litología de la zona, además si existe alguna relación entre las rocas predominantes en la zona (especialmente la caliza) y el fenómeno de reorganizamiento fluvial, de la misma forma se pretende determinar si existe fallas geológicas que afectaron directamente a la distribución actual de la red. En mismo orden, se requiere calcular la razón de bifurcación y determinar si esta cumple con lo propuesto por Horton (1945) y de lo contrario analizar su relación con el clima y litología del área de estudio. Con relación a los perfiles longitudinales, se estudiará su relación con la zona por la que discurre el curso y su relación con algún fenómeno geológico en la zona.

Este estudio, por lo tanto, busca aportar esta serie de datos a la comunidad científica dominicana sobre la microcuenca Caña con el objetivo de que puedan ser utilizados en futuros estudios hidrológicos en un contexto de cambio climático con amenazas cada vez más frecuentes de eventos extremos y sus posibles incidencias en las poblaciones asentadas de este singular y escasamente estudiado espacio del suroeste dominicano.

## 2 Metodología

### 2.1 Área de Estudio

El río Caña nace en la vertiente Norte de la Sierra de Neiba aproximadamente a unos 1,400 metros sobre el nivel del mar. Respecto a su división político-administrativa, la microcuenca del río Caña abarca los municipios de El Cercado y Las Matas de Farfán en la provincia de San Juan y las comunidades de El Llano, Juan Santiago y Hondo Valle de la provincia de Elías Piña. Geográficamente, se localiza entre las coordenadas  $18^{\circ} 56' 25.32''$  N y  $18^{\circ} 37' 39.64''$  N latitud norte y  $71^{\circ} 27' 18.45''$  W y  $71^{\circ} 44' 03.63''$  W longitud oeste (Ministerio de Medio ambiente y Recursos naturales, 2016) (figura 1).

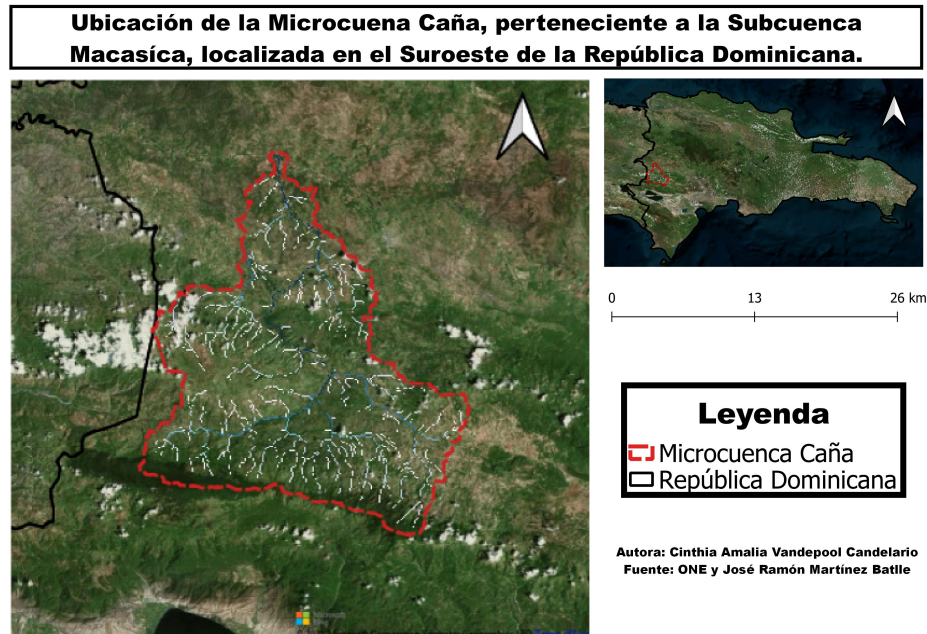


Figure 1: Ubicación Microcuenca del Río Caña

De acuerdo al mapa Zonas de Vida (OEA, 1967), la mayor superficie de la cuenca lo ocupa el Bosque húmedo subtropical, se caracteriza por presentar topografía que varía desde plana hasta accidentada con un patrón de lluvia que varía de 1000 mm. a 2000 mm. Según la ubicación de las áreas, la biotemperatura media anual es de  $23^{\circ}\text{C}$  a  $24^{\circ}\text{C}$  con una evapotranspiración potencial estimada en promedio de 20% menor que la precipitación media total anual. El Bosque muy húmedo Montano Bajo es la segunda en extensión, se caracteriza por la presencia de escarchas temporales, precipitaciones que alcanzar cantidades mayores a los 2,000 mm. totales anuales con una evapotranspiración potencial estimada en promedio de 55% menor que la precipitación media total anual, su topografía generalmente accidentada con elevaciones que van desde los 850 hasta los 2,100 metros y en menor proporción lo ocupa el bosque húmedo montano bajo (Ministerio de Medio ambiente y Recursos naturales, 2016).

La mayor parte de la cuenca se localiza sobre la vertiente Norte del sistema geomorfológico de la Sierra de Neiba y, en menor proporción, sobre el Valle de San Juan, siendo la geología conformada, en mayor proporción, por caliza tipo Neiba, marga con calcarenita tipo sombrerito, marga con intercalaciones de bancos de caliza arenosa, arenisca, marga arenosa, conglomerados, conglomerados poligénico, molasa marina y continental y arena; y en menor proporción está conformada por caliza en bancos de espesores variables con nódulos e intercalaciones de pedernal de

color blanco-crema, depósitos fluviales, depósitos cuaternarios indiferenciados, basaltos, tobas, aglomerados y rocas volcánicas submarinas (Ministerio de Medio ambiente y Recursos naturales, 2016) (Ver figura 2)

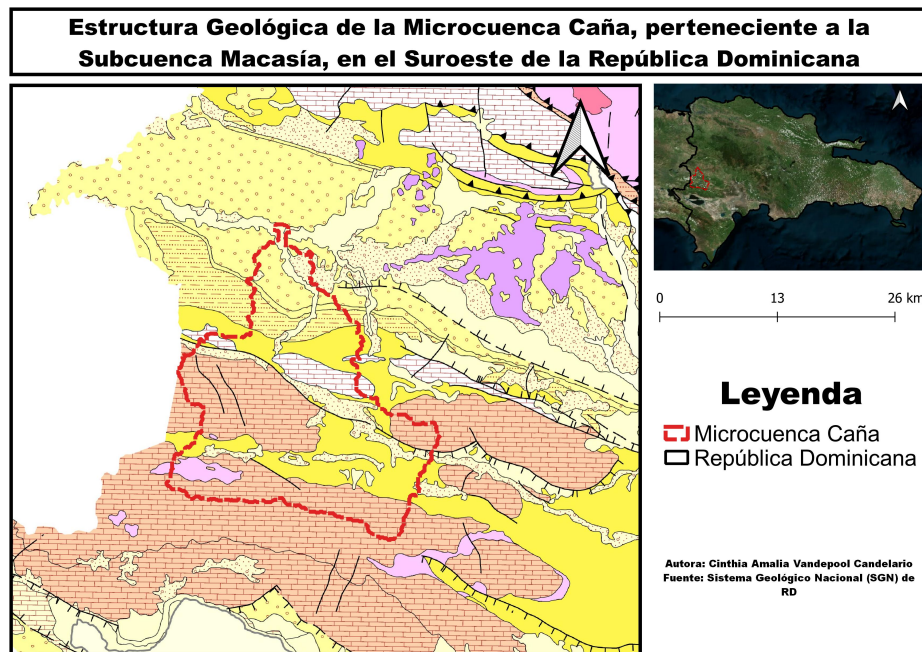


Figure 2: Estructura Geológica de la Microcuenca Caña

## 2.2 Materiales, fuentes de datos y métodos

Para la elaboración de esta investigación se emplearon métodos de análisis morfométrico a partir de un modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca de interés, el cual es un modelo simbólico, de estructura numérica y digital que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar que se distribuye en un espacio bidimensional (Burgos & Salcedo, 2014); inicialmente se cargó una serie de paquetes de R, con el objetivo de adecuar el entorno para la ejecución de los códigos necesarios, entre los que se destacan *rgrass7*, *mapview*, *leaflet*, *tidyverse*, entre otros [et al.]. El paquete *rgrass7* se situó encima del software GRASS GIS (GRASS Development Team, 1998–2021), siendo este último el que se ejecutó en el *backend* los algoritmos requeridos para producir los resultados morfométricos, a continuación se detallaran los procedimientos implementados.

En primer lugar, se importó a R, como *SpatialGridDataFrame*, un MDE (Burgos & Salcedo, 2014) alojado en la base de datos de GRASS GIS (GRASS Development Team, 1998–2021), se estableció su ruta y convirtiéndolo a su vez en un objeto raster por medio del paquete raster de R; partiendo del complemento *r.watershed* (el cual genera un conjunto de mapas que indican: *la acumulación de flujo, la dirección del drenaje, la ubicación de los arroyos y las cuencas hidrográficas* (GRASS Development Team, 2003g)) y del MDE se generaron diversas capas calculando así los parámetros hidrográficos de la cuenca del río caña y sus redes de drenaje, además, seguido a esto se importó un conjunto de capas ráster de GRASS GIS a R, como el mapa de red de drenaje y el mapa de cuencas visualizándolas por medio de *leaflet*.

Utilizando el complemento de GRASS GIS *r.water.outlet* (GRASS Development Team, 2003f) y apoyándose en los paquetes *mapview* (Tim Appelhans and others, 2020) y *leaflet* se extrajo la cuenca de drenaje a partir de un mapa de dirección de flujos con un umbral de acumulación de 80 celdas y las coordenadas de la desembocadura de la cuenca caña (-71.62524,18.94026).

Posteriormente se estableció una máscara usando el límite de la cuenca Caña para luego realizar la extracción partir del MDE de la red de drenaje utilizando el complemento de GRASS GIS *r.stream.extract* (GRASS Development Team, 2003d) desde R. Tras esto, se utilizó el complemento *r.stream* (GRASS Development Team, 2003e) para generar un mapa de dirección de flujo, *r.stream.order* (GRASS Development Team, 2003b) para un mapa de orden de red según varios métodos, entre ellos el método de Strahler y de Horton, a partir de *r.stream.basins* (GRASS Development Team, 2003c) un mapa de cuencas según órdenes de red y apoyándose del complemento *r.stream.stats* (GRASS Development Team, 2003a) se generó las estadísticas de red resumidas por órdenes, incluyendo la razón de bifurcación.

Por último, obtuvimos el curso más largo de la microcuenca a partir de la función *LfpNetwork* creada por José Ramón Martínez (Batlle, 2021), con la misma función, además, pudimos obtener los cursos más largos de las cuencas tributarias. Seguido a esto se generaron los perfiles longitudinales de la microcuenca, se calcularon sus índices de concavidad y a partir de las herramientas *QGIS* y *Google EARTH* cruzamos la información geológica con los patrones de concavidad/convexidad.

### 3 Resultados

A partir de los códigos ejecutados determinamos que la microcuenca del río caña posee una superficie de 525 km<sup>2</sup> con un perímetro de 139 km, presentando una forma similar a la de un triángulo, presenta mayor extensión en el Sur reduciendo su extensión así el Norte. (figura ??). Esta microcuenca posee una elevación máxima de 2,231 metros sobre el nivel del mar, una elevación mínima de 330 metros sobre el nivel del mar y una elevación media de 958 metros. Además, presenta una pendiente media de 10.56 (figura3 figura ??).

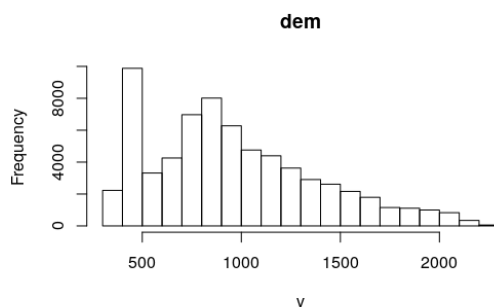


Figure 3: Pendiente

La red de drenaje de la microcuenca Caña posee longitud de 445 km<sup>2</sup> distribuidos en 271 cursos de fluviales con una densidad de drenaje de 0.82 km/km<sup>2</sup>, además el orden máximo alcanzado fue de 5.(figura 4) (Ver tabla1). La mayor parte de la red discurre por caliza, marga y conglomerados; En el tramo alto de la cuenca la red de drenaje es más ancha, concentrándose en esta zona la mayor parte de los cursos mientras en la zona intermedia la red se encoge, disminuyendo también el número de cursos fluviales.



Esta red presenta un patrón de drenaje mixto siendo predominantemente un patrón detrítico en la cuenca media, rectangular en parte alta y baja y paralelo en algunas zonas de la cuenca media. En la zona en donde se presenta un patrón detrítico coincide con calizas, margas y basalto, en la zona en donde predomina el patrón de drenaje rectangular se encuentran rocas de tipo caliza de la formación Neiba y conglomerados mientras en la zona que se encuentra un patrón paralelo predominan las margas y las areniscas.

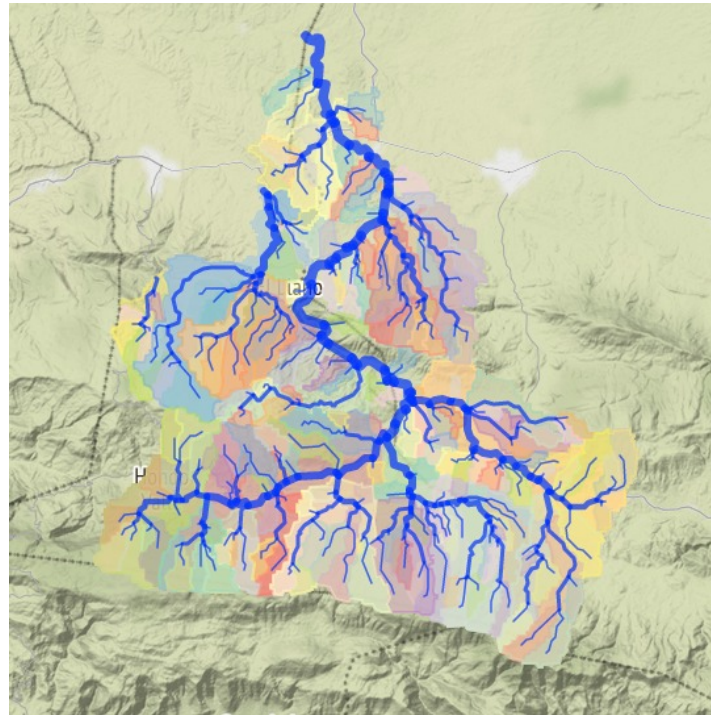


Figure 4: Red de drenaje de la microcuenca Caña

Table 1: Número de Cursos fluviales en función del Orden

Orden de Red	No. de Cursos fluviales
1	204
2	50
3	12
4	4
5	1

A continuación, se indicarán la razón de bifurcación de todos los órdenes de red de la microcuenca caña, utilizando dos procedimientos distintos: La razón de bifurcación promedio del par de órdenes 1|2 es  $204/50=4.08$ , para el par de órdenes 2|3 es  $50/12=4.16$ , para el par de órdenes 3|4 es  $12/4=3$  y para el par de órdenes 4|5 es  $4/1=4$ ; el valor promedio es  $R_b= 3.811667$ . Mientras que la razón de bifurcación por medio de coeficientes de regresión es  $R_b= 3.7292$  (figura 5). Además, pudimos observar que las ramificaciones de orden 1 y 2 son las que presentan un grado de bifurcación más alto, las cuales discurren, en mayor proporción, sobre caliza de tipo Neiba y Marga.

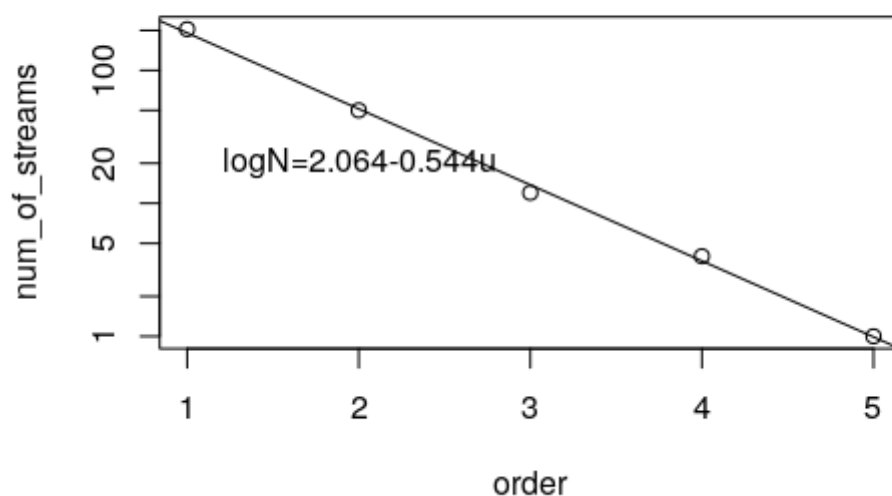


Figure 5: Recta de regresión para el modelo “número de cursos fluviales es función del orden de red” y ecuación correspondiente

EL curso más largo posee una longitud de 58.1 Kilómetros y discurre por el lado occidental de la cuenca, sobre una falla que atraviesa la cuenca en su zona intermedia (figura 6). En función de los resultados obtenidos, se observó que la mayor parte de los cursos fluviales de la microcuenca presentan un perfil cóncavo y en pocas ocasiones presentan un perfil convexo, provocado esto por estar en zona de cabecera o por discurrir sobre depósitos aluviales; además, algunos flujos presentan un perfil rectilíneo que también puede deberse al tipo de material por el que discurre.

A continuación se resumen algunos parametros morfométricos no mencionados anteriormente: (Ver tabla2)

Table 2: Parametros Morfometricos de la Microcuenca Caña

Parámetros	Valores
Orientación Centroide de la cuenca	226125.00
Norte Centroide de la cuenca	2075805.00
Rectángulo que contiene la cuenca N-O	('211500', '2096370')
Rectángulo que contiene la cuenca S-E	('241650', '2061540')
Longitud del vector director [km]	20.63435024419233
Orientación predominante [grado desde el norte, en sentido contrario a las agujas del reloj]	1.4441150421051312
Coefficiente de compacidad	5.390348659271303
Relación de circularidad	0.33967691382621185
Diámetro topológico	53.0

Parámetros	Valores
Relación de alargamiento	0.472103656324998
Factor de forma	9.58527016453617
Tiempo de concentración (Giandotti, 1934) [hr]	4.981885705233938
Longitud del canal principal [km]	54.757012947
Pendiente media del canal principal [porcentaje]	3.57379418847005
Longitud media de la ladera [m]	152.0461
Magnitud	147.0
Frecuencia de flujo de primer orden	0.2800742797000376
Relación de longitud (Horton)	2.1685
Ratio de superficie (Horton)	3.9485
Relación de inclinación (Horton)	1.6639

#### 4 Discusión

Gracias a las investigaciones y observaciones realizadas se obtuvieron las características morfométricas de la microcuenca Caña. Concretamente se determinó que esta microcuenca presenta un patrón de drenaje detrítico, rectangular y paralelo que según (Elorza, 2008) se debe a la interacción entre el flujo y los materiales erosionables y también se observó que la densidad de drenaje de la microcuenca es baja ( $0.82 \text{ km/km}^2$ ) lo que se interpreta en que los suelos de la cuenca son poco erosionables y presentan escasa capa vegetal (Manuel Córdova, 2016).

También, al superponer la red de drenaje sobre el mapa geológico nacional, se observó que existen la posibilidad de un proceso de reorganizamiento del drenaje, ya que la mayor parte de este curso discurre sobre rocas calizas y margas, de la misma forma se observó que la cuenca es atravesada en su parte intermedia por una falla, que puede provocar el encogimiento de la red en la parte media-baja. Además, por medio del estudio de la red de drenaje, creemos que el curso principal pudo haber atravesado por un proceso de migración lateral, proceso que pudo ser producto del movimiento de tectónico.

Del mismo modo, se analizó el índice de concavidad de la microcuenca observando que en su mayoría los cursos fluviales presentan un perfil cóncavo, otra parte presentan un perfil convexo y una minoría un perfil rectilíneo; el resultado de los índices cóncavos y convexos se pueden deber a la zona por la que discurre esos cursos ya sea en zona de cabecera o sobre depósitos aluviales, con relación al perfil rectilíneo pocos autores hacen referencia de este por lo que será necesario llevar a cabo nuevas investigaciones.

Con relación a la razón de bifurcación, según Horton (1945) esta razón debe ser constante entre un par de órdenes y el otro, pero en la microcuenca de estudio esto no sucede, aunque estas variaciones fueron mínimas se requerirán estudios más profundos para determinar si esto es producto de las variaciones climáticas o litológicas de esta zona, observando, además, que el cálculo de la razón de bifurcación promedio y la razón de bifurcación por medio de coeficientes de regresión obtuvimos valores distintos, pero con una diferencia pequeña (0.08).

Como consecuencia de los hallazgos de esta investigación se calcularon algunos de los parámetros morfométricos de la microcuenca Caña, sin embargo, este trabajo solo representa la base para formular nuevas hipótesis que requerirán nuevas investigaciones, no solo de esta microcuenca sino también en todos los sistemas fluviales de la isla, ya que este tipo de estudios son escasos o inexistentes en nuestro país.



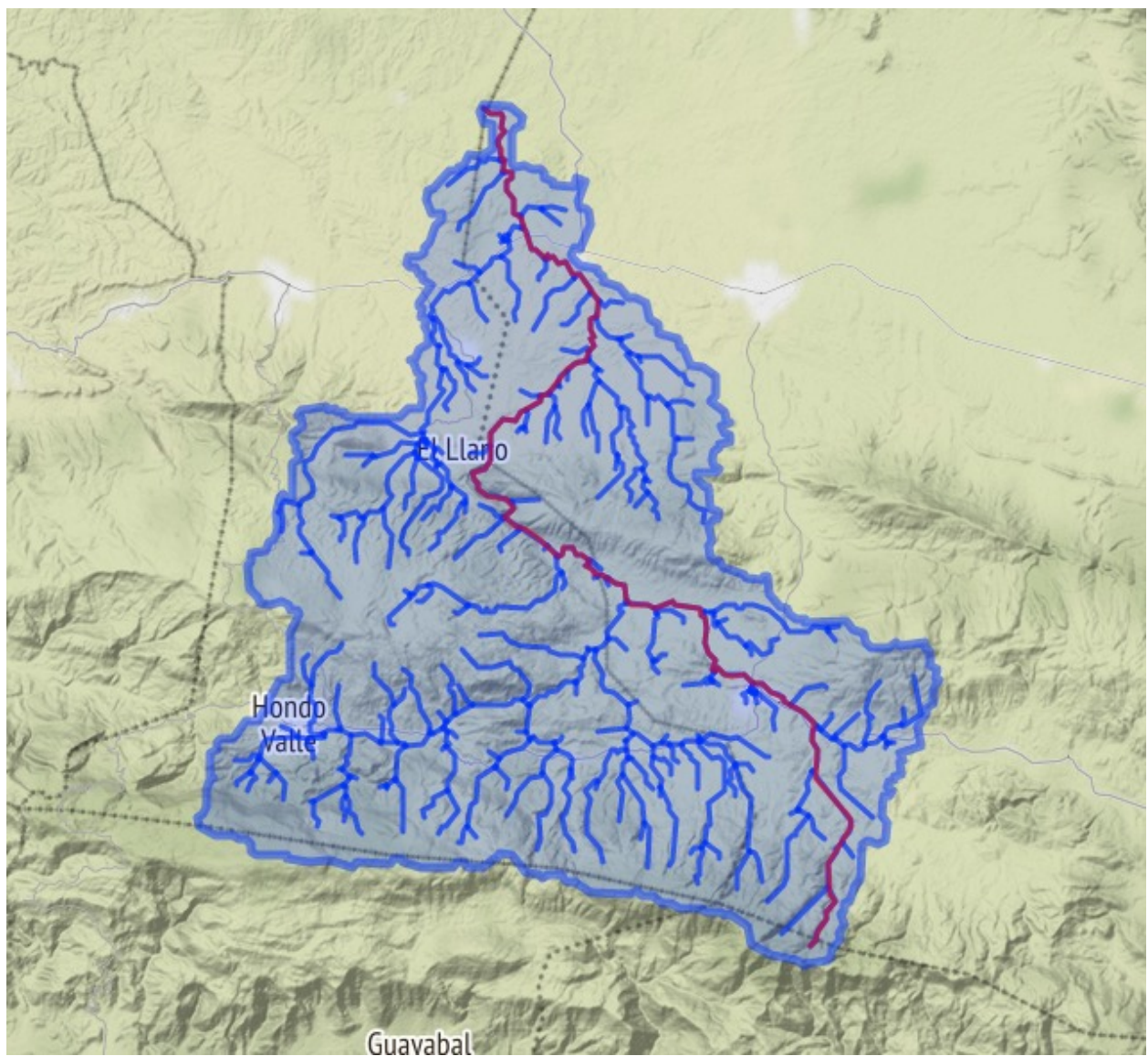


Figure 6: Curso fluvial más largo de la Microcuenca Caña

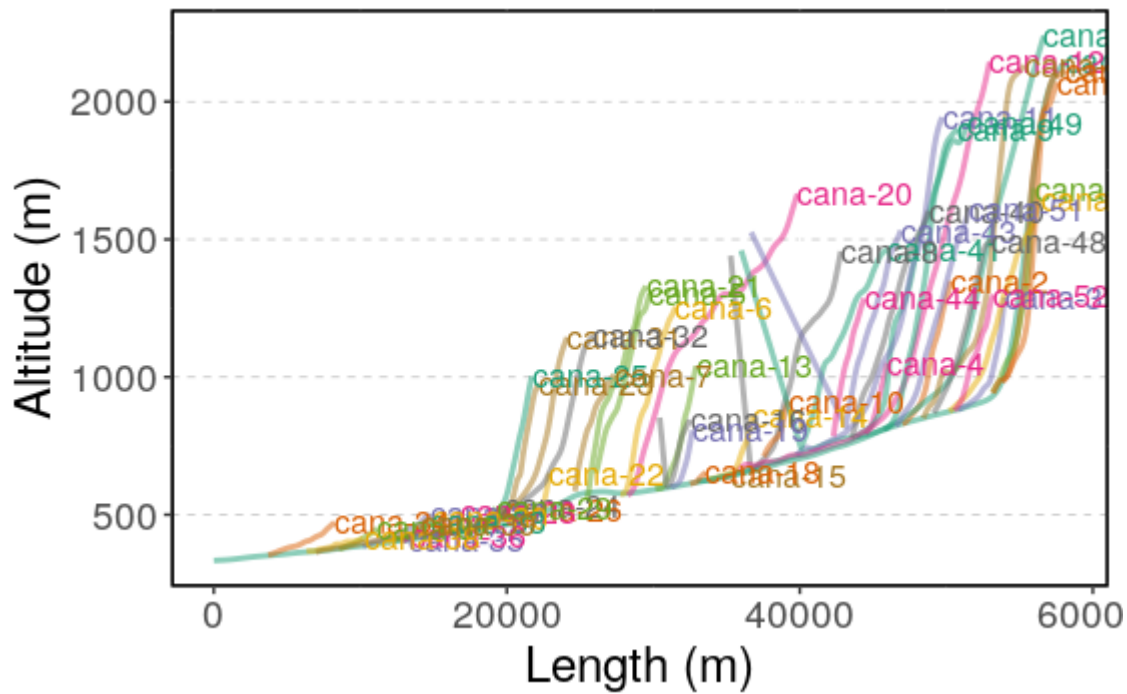


Figure 7: Perfil de Concavidad

- 5 Agradecimientos
- 6 Información de soporte
- ...

## 7 Script reproducible

```
#parte reutilizable del script ----
#cargar paquetes
library(rgrass7)
library(sp)
library(sf)
library(raster)
gisdbase <- 'grass-data-test' #Base de datos de GRASS GIS
wd <- getwd() #Directorio de trabajo
wd
loc <- initGRASS(gisBase = "/usr/lib/grass78/",
                 home = wd,
                 gisDbase = paste(wd, gisdbase, sep = '/'),
                 location = 'cana',
                 mapset = "PERMANENT",
                 override = TRUE)

#unlink_.$islock()
```

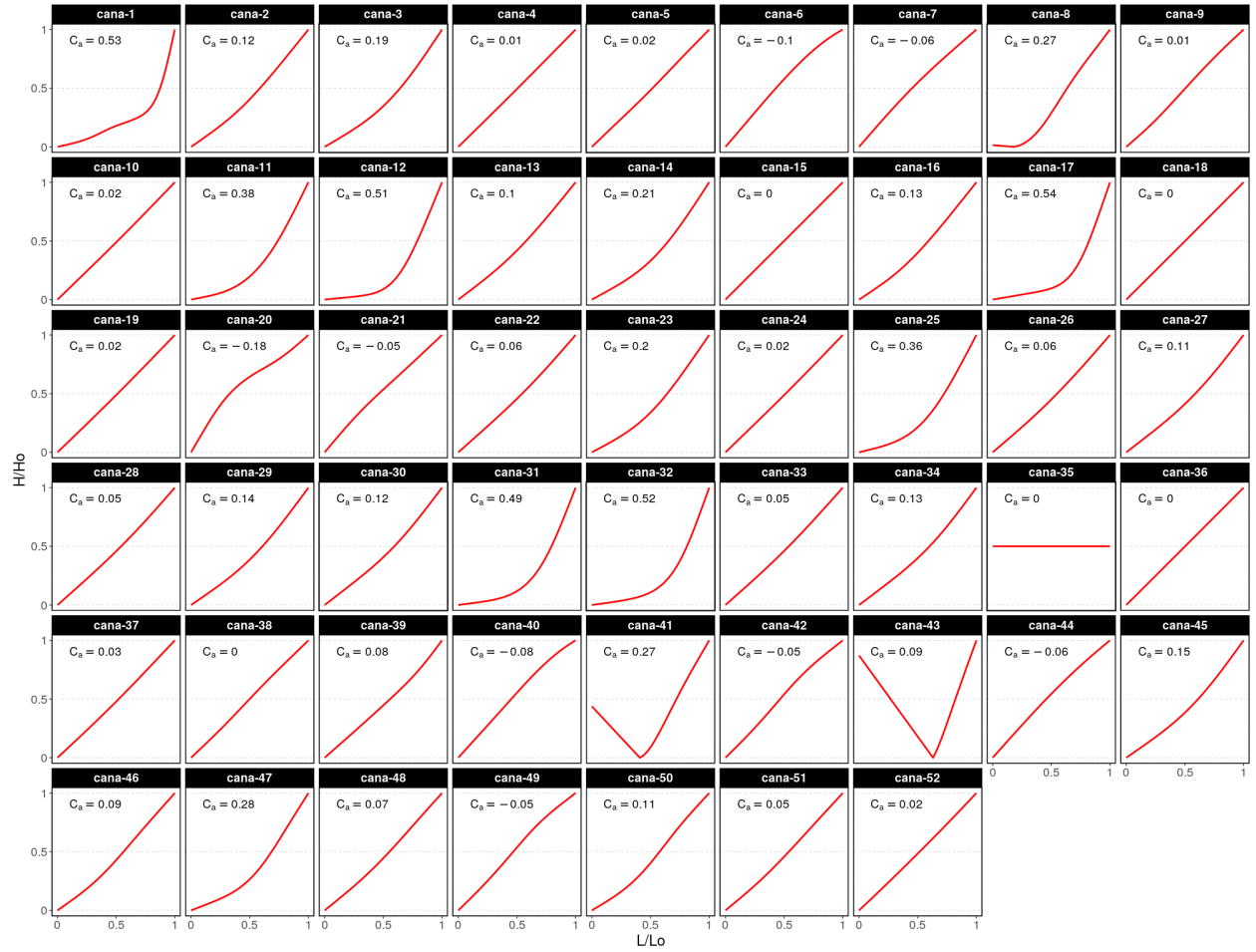


Figure 8: Índice de Concavidad

```

#Fin de la parte reutilizable

#video 4 ----
#Definir proyección de la región de GRASS GIS, importar fuente y utilizarla para definir extensión
#Muestra la definición de la región
gmeta()
#Definir ruta del DEM
dem <- 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_cana.tif'

#Definir la proyección de la región basada en DEM
execGRASS(
  cmd = 'g.proj',
  flags = c('t','c'),
  georef=dem)
#Muestra la definición de la región modificada
gmeta()

#Importar mapa raster
#r.in.gdal importa la fuente a GRASS
execGRASS(
  cmd = 'r.in.gdal',
  flags=c('overwrite','quiet'),
  parameters=list(
    input=dem,
    output='dem'
  )
)
#Actualizar la extensión de la región al DEM, sólo por precaución
execGRASS(
  cmd = 'g.region',
  parameters=list(
    raster = 'dem',
    align = 'dem'
  )
)
#Importar un mapa vectorial también
demext <- 'datos-fuente/cuenca_cana.geojson'
execGRASS(
  cmd = 'v.in.ogr',
  flags=c('overwrite','quiet'),
  parameters=list(
    input=demext,
    output='dem_extent'
  )
)
#Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa
execGRASS(

```

```

'g.list',
flags = 't',
parameters = list(
  type = c('raster', 'vector')
)
)

#Ver los addons disponibles en el repositorio oficial de GRASS GIS, incluyendo descripción
execGRASS(
  cmd = 'g.extension',
  flags = 'c'
)

#Video 5 Explorar datos espaciales básicos entre GRASS y R ----
#Cargar en R el DEM (mapa ráster)
use_sp()
dem_sp <- readRAST('dem')
op <- par()
plot(dem_sp)

#Cargar a R el mapa vectorial de una cuenca que se encuentra alojado fuera de GRASS, hacer el plot
rutacana <- 'datos-fuente/cuenca_cana.geojson'
cana <- st_read(rutacana)
plot(dem_sp)
plot(cana, add=T, col='transparent', border='black', lwd=5);par(op[c('mfrow','mar')])

#Analizar el DEM dentro de la cuenca del rio cana
dem_r0 <- raster(dem_sp)
dem_r1 <- crop(dem_r0, cana)
dem_cana <- mask(dem_r1, cana)
plot(dem_cana)

summary(dem_cana)
hist(dem_cana)

#Obtener variables de terreno básicas con el paquete raster dentro de R
pend_cana <- terrain(x = dem_cana, opt = 'slope', unit = 'degrees')
plot(pend_cana)

#video 6 Calcular parámetros hidrográficos con r.watershed. Visualizar con leaflet ----
# Calcular parámetros hidrográficos de interés usando 'r.watershed'
execGRASS(
  "r.watershed",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    elevation = "dem",
    accumulation = "accum-de-rwshed",
    stream = "stream-de-rwshed",

```

```

    drainage = "drainage-dir-de-rwshed",
    basin = 'basins',
    half_basin = 'half-basins',
    threshold = 80
  )
)
# Traer capas a R
#Usar Spatial*
library(sp)
use_sp()
#Paquete manejo de los raster
library(raster)
#DEM
dem <- raster(readRAST('dem'))
#Basins
basins <- raster(readRAST('basins'))
#Stream network
stream <- raster(readRAST('stream-de-rwshed'))
stream3857 <- projectRaster(stream, crs = CRS("+init=epsg:3857"), method = 'ngb')
#Generar un vectorial de extensión de capa en EPSG:4326
e <- extent(stream)
e <- as(e, 'SpatialPolygons')
proj4string(e) <- CRS("+init=epsg:32619")
e <- spTransform(e, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))

# Visualizar capas con 'leaflet'
library(leaflet)
library(leafem)
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addRasterImage(dem, group='DEM', opacity = 0.5) %>%
  addRasterImage(
    ratify(basins),
    group='basins', opacity = 0.7,
    colors = sample(rep(RColorBrewer::brewer.pal(12, 'Set3'),1000))) %>%
  addRasterImage(stream3857, project = F, group='str', opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = '
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain','DEM','basins','str'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE)) %>%
  addHomeButton(extent(e), 'Ver todo')

#Video 7 Extraer una cuenca de drenaje con r.water.outlet. Visualizar con mapview y leaflet ----
# Obtener las coordenadas de la desembocadura de la cuenca de interés
library(mapview)
mapview(
  stream3857, method='ngb', col.regions = 'blue',
  legend = FALSE, label = FALSE, maxpixels = 910425

```



```

)
# Convertir las coordenadas lat/lon a EPSG:32619
my_trans <- function(coords = NULL) {
  require(sp)
  pt <- SpatialPoints(matrix(coords, ncol = 2), CRS("+init=epsg:4326"))
  foo <- spTransform(pt, CRSobj = CRS("+init=epsg:32619"))
  bar <- as.vector(coordinates(foo))
  return(bar)
}
cana_out <- my_trans(coords = c(-71.62524,18.94026))
cana_out
## Extraer la cuenca de interés
execGRASS(
  "r.water.outlet",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'drainage-dir-de-rwshed',
    output = 'cana-basin',
    coordinates = cana_out
  )
)
## Convertir la cuenca a vectorial en GRASS
execGRASS(
  "r.to.vect",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'cana-basin',
    output = 'cana_basin',
    type = 'area'
  )
)
## Mostrar lista nuevamente
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
## Traer a R la cuenca del rio cana
cana_bas <- readVECT('cana_basin')
cana_bas
plot(cana_bas)
cana_bas4326 <- spTransform(cana_bas, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain) %>%
  addRasterImage(stream, opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = 'blue') %>%

```

```

addPolygons(data = cana_bas4326) %>%
leaflet::addHomeButton(extent(cana_bas4326), 'Ver cuenca')

#Video 8 Extraer una red drenaje con r.stream.extract. Visualizar con leaflet ----
#Usar la cuenca del rio cana como máscara
execGRASS(
  "r.mask",
  flags = c('verbose','overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    vector = 'cana_basin'
  )
)
# Extraer la red de drenaje de la cuenca de interés
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'dem',
    threshold = 80,
    stream_raster = 'cana-stream-de-rstr',
    stream_vector = 'cana_stream_de_rstr'
  )
)
# Mostrar lista nuevamente
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
## Traer a R la red de drenaje del rio cana
cana_net <- readVECT('cana_stream_de_rstr', ignore.stderr = T)
cana_net
plot(cana_net)
cana_net4326 <- spTransform(cana_net, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
cana_net4326
cana_centroid <- coordinates(rgeos::gCentroid(cana_bas4326))
cana_centroid
cana_net_r <- raster(readRAST('cana-stream-de-rstr'))
cana_net_r
cana_net_r3857 <- projectRaster(cana_net_r, crs = CRS("+init=epsg:3857"), method = 'ngb')
cana_net_r3857
leaflet() %>%
  setView(lng = cana_centroid[1], lat = cana_centroid[2], zoom = 11) %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addRasterImage(cana_net_r3857, opacity = 0.7, method = 'ngb', colors = 'grey20', group = 'str_

```

```

addPolylines(data = cana_net4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'str_vect') %>%
leafem::addHomeButton(extent(cana_net4326), 'Ver todo') %>%
addLayersControl(
  overlayGroups = c('terrain','str_vect','str_raster'),
  options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

#Video 10 Orden de red, morfometría y análisis hortoniano usando r.stream ----
# Crear mapa de dirección de flujo a partir de r.stream
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'dem',
    threshold = 80,
    direction = 'drainage-dir-de-rstr'
  )
)
#Crear mapas de órdenes de red
execGRASS(
  "r.stream.order",
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'cana-stream-de-rstr',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    accumulation = 'accum-de-rwshed',
    stream_vect = 'order_all',
    strahler = 'order-strahler',
    horton = 'order-orton',
    shreve = 'order-shreve',
    hack = 'order-hack-gravelius',
    topo = 'order-topology'
  )
)
# Mostrar lista nuevamente
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
# Visualizar la red con leaflet
#Simbología única
order <- readVECT('order_all')

order4326 <- spTransform(order, CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))

```

```

leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = order4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(strahler),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                          weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = T,
                                 style = list(
                                   "font-size" = "8px",
                                   "background" = "rgba(255, 255, 255, 0.5)",
                                   "background-clip" = "padding-box",
                                   "padding" = "1px"))) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain', 'order'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

#Simbología aplicando grosor según orden de red
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = order4326, weight = order4326$strahler*1.5, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(strahler),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                          weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = F)) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
  addLayersControl(
    overlayGroups = c('terrain', 'order'),
    options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

#Delimitar cuencas según orden de red de Strahler
#Obtener órdenes de red mínimo y máximo
#Estadísticas para obtener los valores mínimo y máximo del orden de red de Strahler
rinfo.ordstra <- execGRASS(
  'r.info',
  flags = 'r',
  parameters = list(
    map = 'order-strahler'
  )
)

#Órdenes de red mínimo y máximo
minmaxord <- as.numeric(
  stringr::str_extract_all(
    attributes(rinfo.ordstra)$resOut,
    "[0-9]+"
  )
)

```

```

    )
  )
  minmaxord

### Delimitar cuencas, convertirlas de ráster a vectorial
sapply(
  min(minmaxord):max(minmaxord),
  function(x){
    execGRASS(
      "r.stream.basins",
      flags = c('overwrite','c','quiet'),
      parameters = list(
        direction = 'drainage-dir-de-rstr',
        stream_rast = 'order-strahler',
        cats = as.character(x),
        basins = paste0('r-stream-basins-',x)
      )
    )
  )
  execGRASS(
    "r.to.vect",
    flags=c('overwrite','quiet'),
    parameters = list(
      input = paste0('r-stream-basins-',x),
      output = paste0('r_stream_basins_',x),
      type = 'area'
    )
  )
}
)

#Representar las cuencas con leaflet
sapply(
  min(minmaxord):max(minmaxord),
  function(x){
    assign(
      paste0('orden', x),
      spTransform(readVECT(paste0('r_stream_basins_',x)), CRSobj = CRS("+init=epsg:4326")),
      envir = .GlobalEnv)
  }
)

paleta <- RColorBrewer::brewer.pal(12, 'Set3')
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolygons(data = orden4, stroke = T, weight = 2,
    color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '04') %>%
  addPolygons(data = orden3, stroke = T, weight = 2,
    color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '03') %>%

```

```

addPolygons(data = orden2, stroke = T, weight = 2,
             color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '02') %>%
addPolygons(data = orden1, stroke = T, weight = 2,
             color = ~paleta, fillOpacity = 0.4, group = '01') %>%
addPolylines(
  data = order4326, weight = order4326$strahler*1.5,
  opacity = 0.7, group = 'str_order') %>%
leafem::addHomeButton(extent(order4326), 'Ver todo') %>%
addLayersControl(
  overlayGroups = c('terrain', '01', '02', '03', '04', 'str_order'),
  options = layersControlOptions(collapsed=FALSE))

#Estadísticas de red resumidas por orden de red.
execGRASS(
  "r.stream.stats",
  flags = c('overwrite', 'quiet', 'o'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'order-strahler',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    output = 'cana_stats.txt'
  )
)
file.show('cana_stats.txt')
d <- read.csv("cana_stats.txt", skip=1, header=TRUE)
plot(num_of_streams~order, data=d, log="y")
mod <- lm(log10(num_of_streams)~order, data=d)
abline(mod)
text(2, 20, 'logN=2.064-0.544u')
rb <- 1/10~mod$coefficients[[2]]
rb

#Estadísticas de red ampliadas
execGRASS(
  "r.stream.stats",
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    stream_rast = 'order-strahler',
    direction = 'drainage-dir-de-rstr',
    elevation = 'dem',
    output = 'cana_stats_expanded.txt'
  )
)
file.show('cana_stats_expanded.txt')

#Video 11 mapview(order, col.regions = 'blue', legend = FALSE) ----
mapview(order, col.regions = 'blue', legend = FALSE)

```



```

# Obtener cursos más largos (cargar función propia)
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/lfp_network.R') #Ca
LfpNetwork(
  xycoords = my_trans(c(-71.62524,18.94026)),
  suffix = 'cana',
  stream_vect = 'order_all',
  direction = 'drainage-dir-de-rstr'
)
# Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
# Representar con leaflet
lfp <- readVECT('LfpNetwork_lfp_all_final_cana')
lfp4326 <- spTransform(lfp, CRSObj = CRS("+init=epsg:4326"))
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(
    data = lfp4326, weight = 3, opacity = 0.7, group = 'order',
    label = ~as.character(cat),
    highlightOptions = highlightOptions(color = "white",
                                          weight = 5, bringToFront = F, opacity = 1),
    labelOptions = labelOptions(noHide = T,
                                 style = list(
                                   "font-size" = "8px",
                                   "background" = "rgba(255, 255, 255, 0.5)",
                                   "background-clip" = "padding-box",
                                   "padding" = "1px"))) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(lfp4326), 'Ver todo')

# Exportar a KML
execGRASS(
  'v.out.ogr',
  flags = c('overwrite','quiet'),
  parameters = list(
    input = 'LfpNetwork_lfp_all_final_cana',
    output = 'lfk_kml.kml',
    format = 'KML',
    dsco = 'NameField=cat'
  )
)

# Obtención de perfiles longitudinales e índices de concavidad

```

```

source('lfp_profiles_concavity.R') #Cargado como función "LfpProfilesConcavity"
cana_conv_prof <- LfpProfilesConcavity(
  xycoords = my_trans(c(-71.62524,18.94026)),
  network = 'LfpNetwork_lfp_all_final_cana',
  prefix = 'cana',
  dem = 'dem',
  direction = 'drainage-dir-de-rstr',
  crs = '+init=epsg:32619',
  smns = 1,
  nrow = 6)
## Mostrar resultados
cana_conv_prof$profiles
cana_conv_prof$concavityindex
cana_conv_prof$dimensionlessprofiles

## Tabla dx/dy, tanto en metros como adimensional. Útiles para construir perfiles por cuenta pro
cana_conv_prof$lengthzdata %>% tibble::as.tibble()
cana_conv_prof$lengthzdatadmnl %>% tibble::as.tibble()

```

```

#Video 12 Parámetros de cuenca con r.basin ----
# Convertir a números enteros la extensión y la resolución del DEM
library(raster)
rutadem <- 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_cana.tif'
rawextent <- extent(raster(rutadem))
rawextent
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/integerextent.R')
devtools::source_url('https://raw.githubusercontent.com/geofis/rgrass/master/xyvector.R')
newextent <- intext(e = rawextent, r = 90, type = 'inner')
newextent
gdalUtils::gdalwarp(
  srcfile = 'datos-fuente/srtm_dem_cuenca_cana.tif',
  dstfile = 'demint.tif',
  te = xyvector(newextent),
  tr = c(90,90),
  r = 'bilinear',
  overwrite = T
)
## Importar a sesión de GRASS
rutademint <- 'demint.tif'
execGRASS(
  "g.proj",
  flags = c('t','c'),
  georef=rutademint)
gmeta()
execGRASS(
  "r.in.gdal",
  flags='overwrite',

```

```

parameters=list(
  input=rutademint,
  output="demint"
)
)
execGRASS(
  "g.region",
  parameters=list(
    raster = "demint",
    align = "demint"
  )
)
gmeta()
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
## Generar red de drenaje para obtener coordenada posteriormente
execGRASS(
  "r.stream.extract",
  flags = c('overwrite', 'quiet'),
  parameters = list(
    elevation = 'demint',
    threshold = 80,
    stream_raster = 'stream-de-rstr',
    stream_vector = 'stream_de_rstr'
  )
)
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
## Obtener coordenada
library(sp)
use_sp()
library(mapview)
netw <- spTransform(
  readVECT('stream_de_rstr'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
mapview(netw, col.regions = 'blue', legend = FALSE)

```

```

## Transformar coordenada a EPSG:32619 como número entero
source('my-trans.R')
outlet <- as.integer(my_trans(c(-71.62524,18.94026)))

## Ejecutar 'r.basin'
pref <- 'rbasin_cana'
execGRASS(
  "r.basin",
  flags = 'overwrite',
  parameters = list(
    map = 'demint',
    prefix = pref,
    coordinates = outlet,
    threshold = 80,
    dir = 'salidas-rbasin/cana'
  )
)
execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)
#> Si 'r.basin' arrojará error (sólo en el caso de error, no en caso de advertencia), ejecutar e
#execGRASS(
#  # "g.remove",
#  #flags = 'f',
#  #parameters = list(
#    # type = c('raster', 'vector'),
#    #pattern = paste0(pref, '*')
#  #)
#)
## Cargar los vectoriales transformados a EPSG:4326 para visualizar en leaflet
rbnetw <- spTransform(
  readVECT('rbasin_cana_demint_network'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
rbnetw
rbmain <- spTransform(
  readVECT('rbasin_cana_demint_mainchannel'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
rbmain
rbbasin <- spTransform(
  readVECT('rbasin_cana_demint_basin'),
  CRSobj = CRS("+init=epsg:4326"))
rbbasin

```

```

library(leaflet)
leaflet() %>%
  addProviderTiles(providers$Stamen.Terrain, group = 'terrain') %>%
  addPolylines(data = rbnetw, weight = 3, opacity = 0.7) %>%
  addPolylines(data = rbmain, weight = 3, opacity = 0.7, color = 'red') %>%
  addPolygons(data = rbbasin) %>%
  leafem::addHomeButton(extent(rbbasin), 'Ver cuenca')

## Explorar los parámetros de cuenca
library(readr)
rbcanapar1 <- read_csv("salidas-rbasin/cana/rbasin_cana_demint_parametersT.csv")
rbcanapar1 %>% tibble::as_tibble()
rbcanapar2 <- read_csv(
  "salidas-rbasin/cana/rbasin_cana_demint_parameters.csv",
  skip=2, col_names = c('Parameter', 'Value'))
rbcanapar2 %>% print(n=Inf)

```

*#Video 13 Curva e integral hipsométrica ----*

*# Imprimir lista de mapas ráster y vectoriales dentro en la región/localización activa*

*## Nótese que los paquetes requeridos en esta sesión ('rgrass7', 'raster', 'leaflet', 'leafem')*

```

execGRASS(
  'g.list',
  flags = 't',
  parameters = list(
    type = c('raster', 'vector')
  )
)

## Representar cuencas
library(sp)
use_sp()
library(mapview)
bas2 <- readVECT('r_stream_basins_2')
bas3 <- readVECT('r_stream_basins_3')

## Curva e integral hipsométrica
source('integral_hypsometric_curve.R') #Cargada como función "HypsoIntCurve"
HypsoBasinsOrder2 <- HypsoIntCurve(
  basins = 'r_stream_basins_2',
  dem = 'dem',
  labelfield = 'cat',
  nrow = 2,
  labelsizesize = 4
)

HypsoBasinsOrder2$HypsoInt
HypsoBasinsOrder2$HypsoCurve
mapview(bas2, zcol='cat', col.regions = 'blue', legend = FALSE) %>%

```

```

addStaticLabels(label = bas2$cat)

HypsoBasinsOrder3 <- HypsoIntCurve(
  basins = 'r_stream_basins_3',
  dem = 'dem',
  labelfield = 'cat',
  nrow = 1,
  labelsizesize = 4
)

HypsoBasinsOrder3$HypsoInt
HypsoBasinsOrder3$HypsoCurve
mapview(bas3, zcol='cat', col.regions = 'blue', legend = FALSE) %>%
  addStaticLabels(label = bas3$cat)

```

## Referencias

Batlle, J. R. M. (2021). geomorfologia-master/unidad-4-asignacion-1-procesos-fluviales: Let's map (Version v0.0.0.9000). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4425878>

Burgos, V. H., & Salcedo, A. P. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. *Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos* (2, 2014, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina). Disponible En: [Http://Www. Ina. Gov. Ar/Ifrh-2014/Eje1/1.11. Pdf](http://Www.Ina.Gov.Ar/Ifrh-2014/Eje1/1.11.Pdf). Consultado, 1(10), 2015.

Elorza, M. G. (2008). Geomorfología fluvia i. In *Geomorfología* (pp. 279–283). Pearson Educación.

GRASS Development Team. (1998–2021). GRASS gis. Retrieved May 24, 2021, from <https://grass.osgeo.org/>

GRASS Development Team. (2003a). Calculates horton's statistics for strahler and horton ordered networks created with r.stream.order. Retrieved April 12, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.stats.html>

GRASS Development Team. (2003b). Calculates strahler's and more streams hierarchy. Retrieved April 12, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.order.html>

GRASS Development Team. (2003c). Delineates basins according stream network. Retrieved April 12, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/r.stream.basins.html>

GRASS Development Team. (2003d). Performs stream network extraction. Retrieved April 12, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.stream.extract.html>

GRASS Development Team. (2003e). R.stream.\* modules. Retrieved April 12, 2021, from [https://grasswiki.osgeo.org/wiki/R.stream.\\*\\_modules](https://grasswiki.osgeo.org/wiki/R.stream.*_modules)

GRASS Development Team. (2003f). R.water.outlet - creates watershed basins from a drainage direction map. Retrieved April 2, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.water.outlet.html>

GRASS Development Team. (2003g). R.watershed - calculates hydrological parameters and rusle factors. Retrieved April 2, 2021, from <https://grass.osgeo.org/grass76/manuals/r.watershed.html>

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Morfología de las*



*cuencas hidrológicas.*

Lux Cardona, B. (2016). *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas.*

Manuel Córdova. (2016). Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas. Retrieved May 11, 2021, from [https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id\\_articulo=26](https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26)

Ministerio de Medio ambiente y Recursos naturales. (2016). Macasía. Retrieved April 28, 2021, from <https://ambiente.gob.do/cuencas-hidrograficas/macasia/>

Tim Appelhans and others. (2020). Mapview: Interactive viewing of spatial data in r. Retrieved April 12, 2021, from <https://cran.r-project.org/web/packages/mapview/index.html>