

González, M. A., Gil V., Gentili J. O. (2023). Determinación de inicios de cauces a partir de Modelos Digitales de Superficie. Cuenca alta del arroyo La Ventana (Buenos Aires, Argentina). *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (Artículos), 31, 101-114. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.811>

DETERMINACIÓN DE INICIOS DE CAUCES A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE SUPERFICIE. CUENCA ALTA DEL ARROYO LA VENTANA (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

^aMarilina Ayelén González , ^bVerónica Gil  , ^cJorge Osvaldo Gentili 

Departamento de geografía y turismo. Universidad Nacional del Sur.

12 de octubre 1098 - Cuarto Piso, B8000CTX, B8000 Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

marilina.gonzalez@uns.edu.ar, verogil@uns.edu.ar, jogentili@uns.edu.ar

RESUMEN

A la hora de definir la red hidrográfica de una cuenca es importante localizar de manera precisa los inicios de los cauces ya que esta posición influye en distintos aspectos de la dinámica de una cuenca. En la actualidad, la evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la existencia de los Modelos Digitales de Superficie (MDS) hacen posible la extracción de las redes de drenaje de manera automática, sin embargo, en muchas ocasiones, estos resultados requieren de su constatación en campo o en distintas fuentes de información para validar y lograr una mayor precisión. Por ello, el objetivo de este trabajo es determinar y evaluar el umbral óptimo de localización de los inicios de cauces de la cuenca alta del arroyo La Ventana (Buenos Aires, Argentina) a través de la utilización de un MDS. Para evaluar la idoneidad de los modelos automáticos obtenidos se compararon los resultados obtenidos con imágenes satelitales de alta resolución y control en campo. A su vez, se utilizaron índices morfométricos para determinar las variaciones en la respuesta hidrológica de cada modelo. Los principales resultados indican variaciones tanto en la longitud como en el número de tramos según umbral que repercuten en los resultados de cada índice. Se destaca la importancia de la elección de un umbral óptimo para la obtención del modelo de red de drenaje más acorde con la realidad a partir del cual se puedan extraer datos válidos y concretos.

Palabras clave: red hidrográfica; MDS; morfometría.

DETERMINATION OF CHANNELS HEADS FROM DIGITAL SURFACE MODELS. UPPER BASIN OF LA VENTANA STREAM (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

ABSTRACT

When defining the hydrographic network of a basin, it is important to precisely locate the beginnings of the channels, since this position influences different aspects of the dynamics of a basin. Currently, the evolution of Geographic Information Systems (GIS) and the existence of Digital Surface Models (DSM) make it possible to extract drainage networks automatically, however, on many

occasions, these results require verification in field or in different sources of information to validate and achieve greater precision. Therefore, the objective of this work is to determine and evaluate the optimum location threshold of the channels heads location of upper basin of La Ventana stream (Buenos Aires, Argentina) through the use of a DSM. To evaluate the suitability of the automatic models obtained, the results were compared with high-resolution satellite images and field control. In turn, morphometric indices were used to determine the variations in the hydrological response of each model. The main results indicate variations both in the length and in the number of sections according to the threshold that affect the results of each index. It is highlighted the importance of choosing an optimal threshold to obtain the drainage network model that is most consistent with reality from which valid and specific data can be extracted.

Keywords: hydrographic network; DSM; morphometry.

1. Introducción

El trabajo inicial desde la geomorfología fluvial consiste en delimitar la cuenca hidrográfica y definir su red de drenaje. En esta tarea, conocer de manera precisa la localización de los inicios de cauces tiene gran significancia ya que su reconocimiento proporciona información valiosa acerca de la densidad del drenaje concentrado y además determina las distancias y los tiempos de retorno que rigen la magnitud y concentración de la escorrentía (Senciales González, 1999; Nachtergaele *et al.*, 2002; Charlton, 2008; Gutiérrez Elorza, 2008; Munro, 2010).

Los estudios acerca de la localización del inicio de los cauces fueron desarrollados ampliamente por Horton (1945), Montgomery & Dietrich (1988, 1989, 1992), Montgomery & Buffington (1993), Montgomery & Foufoula-Georgiou (1993), Dietrich & Dunne (1993), Jenson & Domingue (1988), Dietrich *et al.* (1992) y Willgoose *et al.* (1991, 1992). Estos autores expresan la importancia de reconocer los inicios de cauces en el terreno para explicar qué procesos son los que controlan su formación y así poder gestionarlos, protegerlos o restaurarlos. Indican a su vez, que esta ubicación ayuda a comprender el funcionamiento de la cuenca, dada la importante relación que posee esta localización con su respuesta hidrológica. En tiempos más recientes, la tarea de identificar y analizar estas áreas ha sido desestimada en comparación con análisis hidrogeomorfológicos realizados en el sistema aguas abajo (Gomi *et al.*, 2002). Sin embargo, se pueden citar algunos trabajos que siguen en la línea de investigación en los cuales se plantean y discuten distintas metodologías, modelos y procedimientos aplicados a la localización, análisis y gestión de los nacimientos de cauces. Entre ellos Hancock & Evans (2006), Jaeger, Montgomery & Bolton (2007), Tarolli & Dalla Fontana (2009), Henkle *et al.* (2011), Wilson (2012), Lindsay & Seibert (2013), Wohl (2018) y Cazzador *et al.* (2021).

Montgomery & Dietrich (1988, 1989) explican que el inicio de un cauce es el sitio que representa la transición de procesos de ladera a procesos hidrosedimentarios encauzados y que su localización está vinculada a las características físicas del entorno como el área, la pendiente, la litología, la vegetación, el clima, los usos del suelo, etc. Para Henkle *et al.* (2011), su identificación en el campo puede ser relativamente visible, pueden estar representados por una ruptura abrupta o corte transversal al terreno, o ser tan difusos o graduales que su identificación se vuelve algo subjetiva e inclusive puede confundirse con otras geofomas. A esto se suma, además, la compleja tarea de llevar a cabo el reconocimiento de cada uno de ellos en el terreno, cuya dificultad dependerá del área y pendiente de la cuenca y el acceso a los mismos.

En la actualidad, gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica y la evolución de los sensores satelitales que hicieron posible la creación de Modelos Digitales de Superficie (MDS) precisos y de alta resolución, estas dificultades están siendo superadas y los métodos tradicionales de digitalización de las redes de drenaje han sido reemplazados por metodologías más avanzadas (López-Vicente *et al.*, 2014; Nikolakopoulos *et al.*, 2015; Kok *et al.*, 2018; Shavers & Stanislawski, 2020). La disponibilidad de nuevas tecnologías para la medición de la elevación de la superficie terrestre ha abordado la ausencia de datos de alta resolución, lo que ha llevado a un aumento de la utilización de este tipo de herramientas en la realización de estudios de modelado hidrológico, hidráulico y

geomorfológico (Manfreda *et al.*, 2011; Samela *et al.*, 2016; Niyazi *et al.*, 2019; Epuh *et al.*, 2022; Kale *et al.*, 2022; Roy *et al.*, 2022).

Dado que en la definición de las redes de drenaje el MDS considera solo la variable altura se torna necesario en muchas ocasiones constatar en el terreno o en distintas fuentes de datos los modelos obtenidos para lograr la mayor precisión del inicio y desarrollo de las redes. En el área de estudio, dadas las condiciones físicas que caracterizan la cuenca, son numerosos los factores que intervienen en la formación de un cauce y en muchos casos dificultan su reconocimiento. Por ello, el objetivo del trabajo es determinar y evaluar el umbral óptimo de localización de los inicios de cauces de la cuenca alta del arroyo La Ventana (provincia de Buenos Aires) a través de la utilización de un MDS. Para esto se utilizaron distintas metodologías de evaluación que permitirán inferir la respuesta hidrológica de cada modelo y así evaluar y determinar el modelo óptimo acorde con la realidad estudiada para luego aplicarlo a estudios de peligrosidad hídrica.

2. Área de estudio

La cuenca del arroyo La Ventana constituye una parte de la cuenca alta del río Sauce Chico, la cual nace en el Sistema de Ventania y desemboca en el estuario de la bahía Blanca. El área de estudio (Figura 1) posee aproximadamente 9 kilómetros de longitud y se caracteriza por tener pendientes abruptas con valores que varían en el rango de los 0 y los 71 °. Las alturas varían entre los 1134 m s.n.m. y 407 m s.n.m. Su disposición es en sentido este-oeste y la mayor cantidad de afluentes los recibe desde su margen derecha, donde se ubican las mayores pendientes y afloramientos rocosos.

La cuenca se encuentra en un ambiente de clima templado con estaciones térmicas y lluviosas bien definidas (Campo de Ferreras, *et al.*, 2004). Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 14 °C y 20 °C y las precipitaciones presentan una marcada variabilidad espacio-temporal y altitudinal influenciada en gran parte por la presencia del sistema serrano (Campo *et al.*, 2009; Gil, 2010; Gentili & Gil, 2013; Casado & Campo, 2019). Las precipitaciones se producen principalmente en primavera y verano y los montos anuales pueden variar dentro del rango de los 300 mm (años secos) y los 1.000 mm (años húmedos). Son característicos de la región los eventos hidrometeorológicos extremos que ocasionan crecidas (Casado *et al.*, 2007; Gentili *et al.*, 2011). Fitogeográficamente, el área corresponde al Distrito Pampeano Austral (Cabrera, 1976), con pastizales de estepa gramínea como vegetación dominante (Frangi & Bottino, 1995) y presencia de numerosas especies de árboles y arbustos exóticos introducidos (coníferas, eucaliptos y retamas).

La litología característica del área de estudio son las cuarcitas y esquistos fuertemente plegados (Sellés-Martínez, 2001) que forman parte del Grupo Ventana (formación Napostá y Bravard). La zona del valle del arroyo está constituida por materiales de piedemonte del tamaño de los limos, arcillas y arenas y del tipo loess, depositados durante el pleistoceno. Los cauces, en este sector, son intermitentes, permanecen secos durante la mayor parte del año, y sus fondos están formados por material sedimentarios y rocas de tamaños diversos que pueden llegar hasta los 0,50 m. de altura. Según la clasificación de Howard (1967) la tipología de drenaje de la ladera norte de la cuenca es subdendrítica. Se observa una dependencia estructural de la red vinculada a los afloramientos rocosos característicos del área que condicionan su trazado lo que da como resultado tramos rectos y cambios bruscos de dirección de los cursos frente a una tipología dendrítica en la ladera sur, vinculada a una dependencia estructural menor desarrollada sobre una litología con escasos afloramientos rocosos. En la zona central del valle, se encuentran las localidades de Villa Serrana La Gruta y San Andrés de las Sierras. La primera de ellas posee una población estable de 52 habitantes (INDEC, 2010) y en la segunda se desarrolla un proceso de urbanización incipiente.

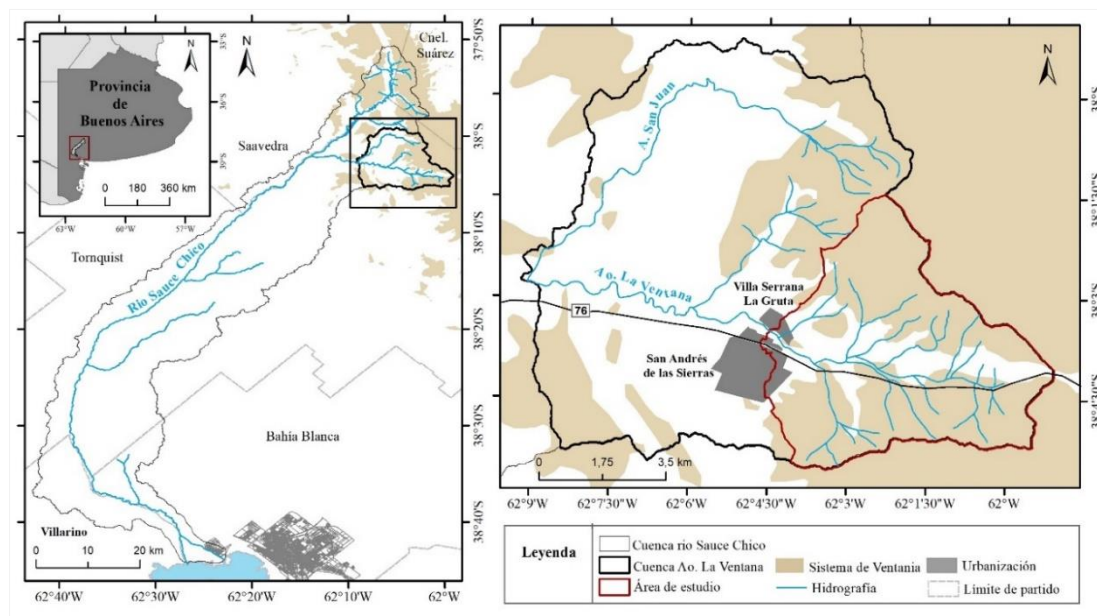


Figura 1. Área de estudio.

Fuente. Elaboración propia sobre la base de las cartas 1:50.000 (IGN) – SIG250 (IGN).

3. Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto, se identificaron visualmente los inicios de cauces del arroyo La Ventana en imágenes satelitales extraídas de Google Earth Pro® del año 2022 previamente georreferenciadas (escala 1:2.000). Con el objetivo de corroborar esta visualización algunos de estos puntos fueron constatados en el campo (Figura 2). Los puntos se desplegaron en una capa vectorial en el software ArcGIS® y fueron utilizados como guías para la localización de los inicios de cauces en la extracción automática de la red hidrográfica.

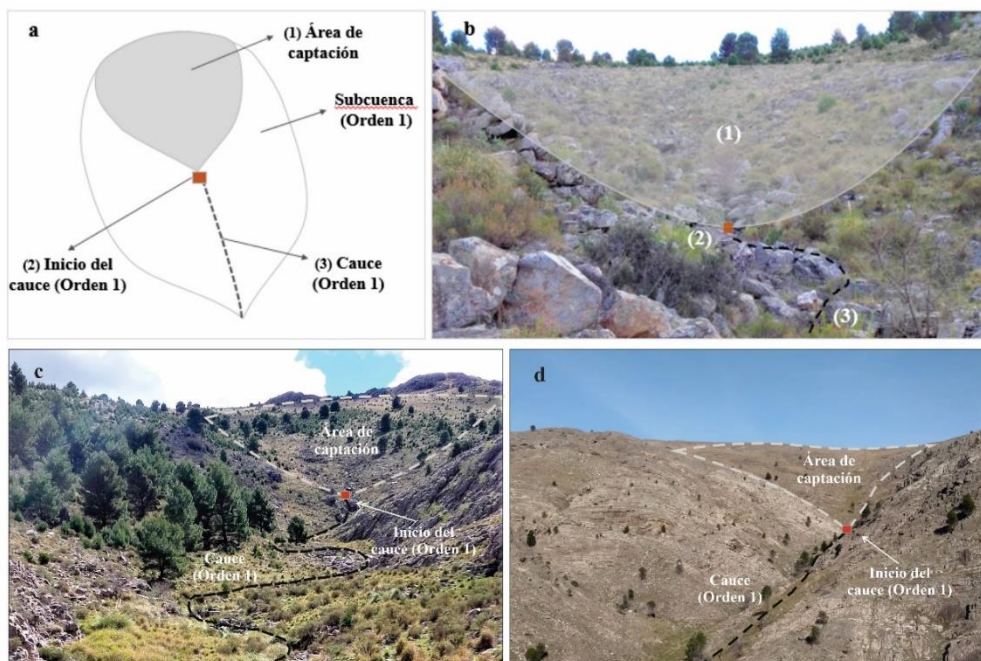


Figura 2. Inicios de cauce y áreas de acumulación: a - b) Se indica tanto en el esquema como en la fotografía el inicio de cauce del orden 1 y su área de acumulación dentro de la subcuenca que corresponde al mismo orden; c - d) fotografías de los autores tomadas en campo donde se observan diferentes inicios de cauce.

Fuente. Elaboración propia sobre la base de Li *et al.* (2020).

La extracción automática de la red de drenaje se llevó a cabo utilizando herramientas y procesos del *Arc Hydro* de ArcGIS® -rellenado de sumideros, dirección del flujo, acumulación del flujo, definición del flujo- y se utilizó como base el MDS que proviene del satélite Alos Palsar de 12,5 x 12,5 metros. Para evaluar el umbral o número de celdas óptimo en la definición del flujo acorde a la realidad, se utilizaron como prueba distintos umbrales -1.000, 500, 300 y 150 píxeles- cuyos resultados fueron comparados con la capa de inicios de cauces de la red hidrográfica identificada en las imágenes satelitales. Luego, para determinar las variaciones en la respuesta hidrológica de cada modelo y así evaluar la idoneidad de los resultados obtenidos, fueron calculados distintos índices morfométricos (Figura 3). Estos se seleccionaron ya que son los más frecuentemente usados en la evaluación de la peligrosidad en cuencas no aforadas de la región (Gil, 2010; Gentili, 2012; Volonté, 2017; Moretto et al., 2019; Gil et al., 2019) y a su vez, porque en sus cálculos consideran las variables de longitud y cantidad de tramos de cauces.

	Índice	Fórmula	
Vinculados a la frecuencia de tramos (según orden)	Frecuencia de drenaje (Fd_1)	NI/A NI: número de cursos de orden 1 A: área de la cuenca. (Strahler, 1964)	Involucra tramos específicos de orden 1 de la red de drenaje
	Relación de bifurcación (R_b)	$R_b = Nu / Nu + 1$ Nu: número de cauces de orden "u". Nu + 1: número de cauces del orden inmediato superior a "u". (Horton, 1945)	
Vinculados a la longitud de tramos (según orden)	Relación de longitud (R_l)	$R_l = Lu/Lu-1$ Lu: longitud de un cauce de orden "u" Lu-1: longitud del orden u-1	Involucra todos los tramos de la red de drenaje
	Densidad de drenaje (D_d)	$D_d = Lt/A$ Lt: longitud total de los cursos. A: área de la cuenca. (Horton, 1945)	
	Coefficiente de torrencialidad (C_t)	$D_d*(NI/A)$ Dd: densidad de drenaje NI: Número de cursos de orden 1 A: área de la cuenca.	Involucra tramos específicos de orden 1 de la red de drenaje

Figura 3. Índices morfométricos utilizados.

Fuente. Elaboración propia sobre la base de Senciales González (1999).

4. Resultados y discusión

Determinación de umbral óptimo y generación de red de drenaje

En la figura 4 se presentan las etapas y la esquematización de los resultados para definir los cauces derivados del uso de las herramientas de *Arc Hydro* de ArcGIS®. En primera medida se aplicó al MDS la herramienta *fill* (Figura 4 a) para obtener una matriz correcta. De esta manera se eliminan depresiones artificiales, hoyos o cualquier otro tipo de error que se comporte como barrera para la fluidez del curso

(Ngula *et al.*, 2019). Luego, a través del comando “dirección del flujo” (Figura 4 b), se creó un patrón de dirección del escurrimiento desde cada celda hasta su mayor pendiente cuesta abajo. El modelo aplicado para este proceso fue el D8, que considera un solo píxel e incorpora sus ocho píxeles vecinos, es decir sus 8 direcciones de salidas válidas, y fue seleccionado por ser el procedimiento más utilizado para la extracción automática de flujos (Maidment, 2002; Li *et al.*, 2020). Mediante su análisis se puede determinar la dirección del descenso con mayor pendiente; cuando lo reconoce, la celda de salida se codifica con el valor que representa esa dirección (Ariza-Villaverde *et al.*, 2013; Nikolakopoulos *et al.*, 2015).

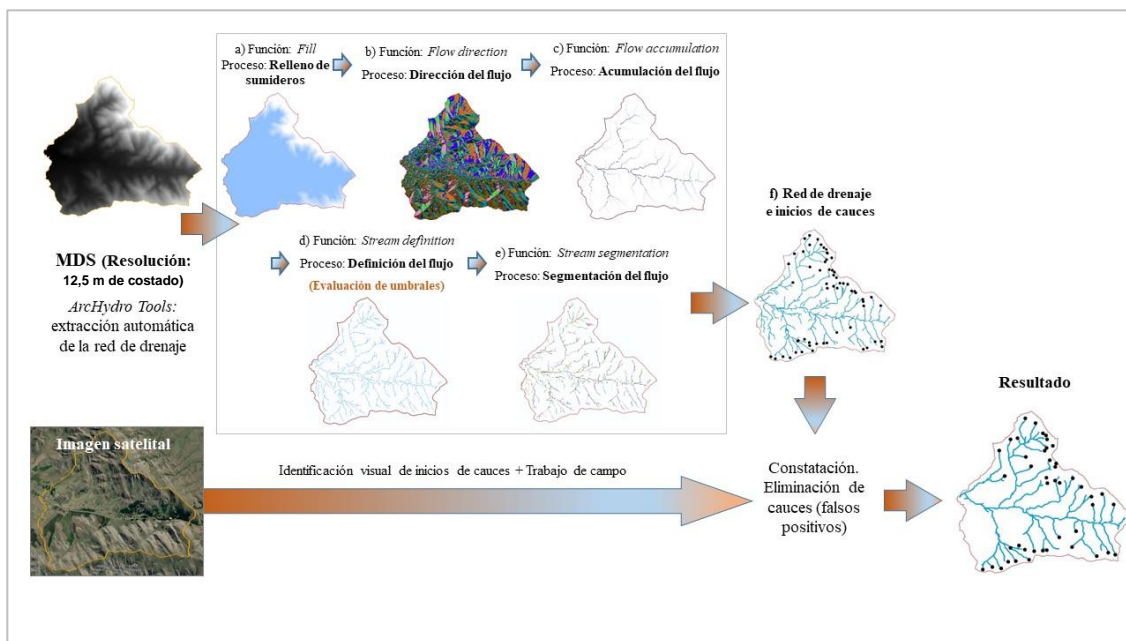


Figura 4. Etapas y esquematización de la metodología y los procesos aplicados a la determinación de inicios de cauce en la cuenca del arroyo La Ventana.

Fuente. Elaboración propia.

Con la herramienta “acumulación del flujo” (Figura 4 c) se calculó la cantidad de agua que fluye dentro de cada celda desde todas las celdas de pendiente descendente en el *ráster* de salida. Aquí se puede observar el volumen acumulado de las celdas que drenan, es decir, las celdas están drenando a un punto específico identificando el curso principal y sus tributarios. En la “definición del flujo” (Figura 4 d) se generó una capa en la que se distinguieron los puntos que recibieron flujo de más de un determinado número de otros puntos. Se definieron los umbrales que se asocian al número de celdas o área que se tiene en cuenta para la generación y la densidad del flujo (o número de ramificaciones). Un valor muy alto resultará en la generación de unos pocos flujos principales, mientras que un valor muy bajo generará una gran cantidad de flujos extremadamente pequeños (Nikolakopoulos *et al.*, 2015). Para obtener las distintas redes de drenaje se utilizaron umbrales de 1.000, 500, 300 y 150 píxeles (Figura 5). La selección del umbral está asociada a una determinada área en km² a partir del cual se define un cauce, por ejemplo, en el caso particular del umbral de 1000 píxeles, se consideran como inicios de cauce los puntos que reciben flujo de un área de al menos 0,156 km².

Una vez obtenida la red para cada umbral, se realizó la “segmentación del flujo” (Figura 4 e), es decir, se generaron capas visualmente iguales a las anteriores, pero dividido cada tramo de cauce entre dos uniones. A partir de estas capas y a través de la función “unión de flujo”, se asignaron valores únicos a secciones de la red lineal *ráster* entre intersecciones y se obtuvo así una capa continua de flujo. A partir de estas capas y siguiendo la metodología de Strahler (1964) se asignaron los órdenes con la función “orden del flujo” (Figura 4 f).

Obtenida y jerarquizada la red de drenaje para cada modelo se procedió a la comparación y validación de los resultados. En primera medida se realizó una constatación visual con los puntos identificados

como inicios de cauces en las imágenes satelitales extraídas de Google Earth Pro®. En esta última fuente, se localizaron 60 inicios cauces de los cuales 58 coincidieron con los extraídos de manera automática a través del MDS (Figura 5). El sistema identificó redes que no se condicen con la realidad y esto puede deberse a que el MDS considera solo la variable altura y asume que todas las líneas de drenaje son canales cuando en la realidad influyen otras variables como la pendiente, la litología y su estructura, la vegetación, entre otras (Nikolakopoulos *et al.*, 2015).

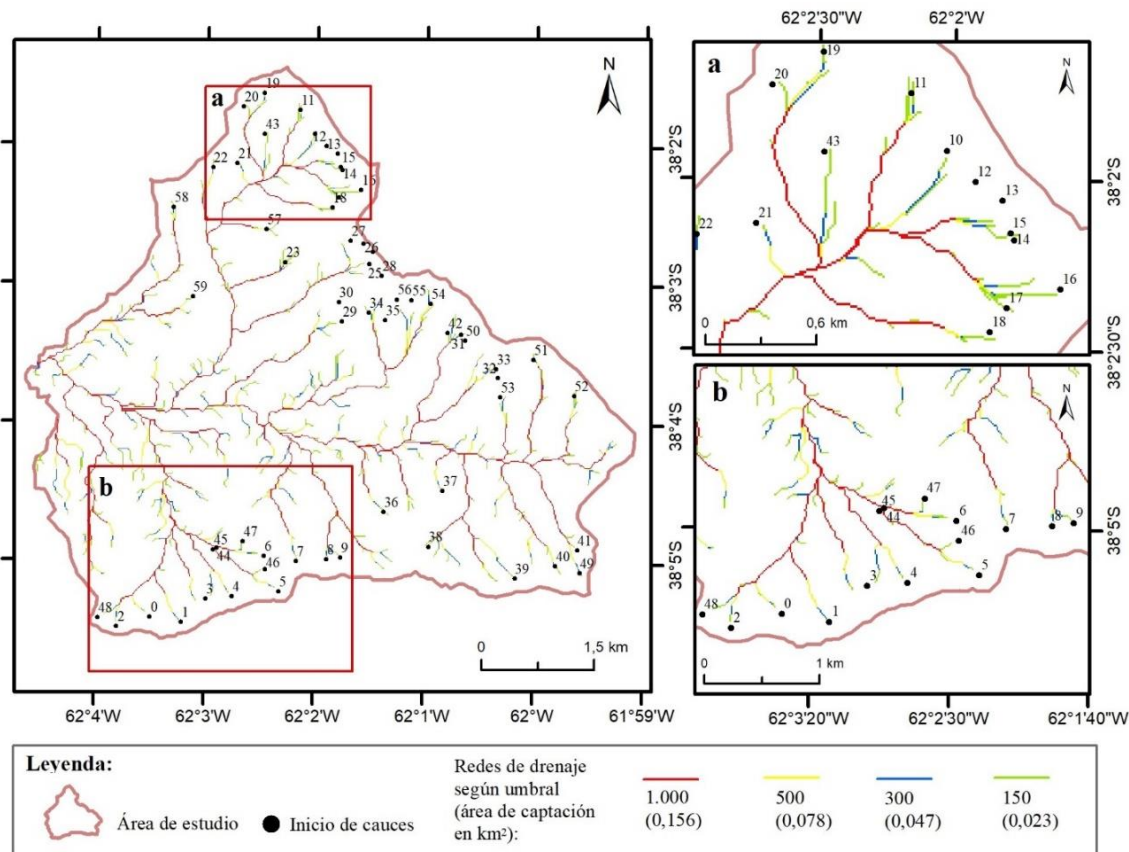


Figura 5. Localización de los inicios de cauces y definición de red de drenaje según umbral.

Fuente. Elaboración propia.

En los recuadros a y b de la figura 5 se observa que la red de drenaje que se obtuvo a través del umbral de 150 píxeles (verde) es la que más se aproxima con la realidad y tienen concordancia con la localización de los inicios de cauces determinados mediante la observación de las imágenes satelitales y en campo. Por su parte, en la red de drenaje obtenida a través del umbral de los 1.000 píxeles, los cursos fluviales comienzan en promedio unos 300 metros aguas abajo de los inicios identificados en la imagen satelital. Cuanto menor fue el umbral seleccionado para extraer la red de drenaje, se obtuvieron inicios de cauces relativamente más próximos a su ubicación en la cuenca.

Constatación de datos modelados a través del cálculo de índices morfométricos

Tal como se observa en la figura 5, los distintos modelos obtenidos a través de la utilización de cada umbral produjeron diferentes resultados no solo en la cantidad de tramos de cursos sino también en las longitudes de dichos tramos. Para obtener las longitudes de los tramos de cada red de drenaje se utilizó la herramienta *Stream Link* que permitió vectorizar cada *raster* de segmentación del flujo y convertirlo en una capa de líneas de drenaje continuas y divididas en órdenes. La longitud total extraída de los cauces varió en un rango entre los 129,9 (150 píxeles) y los 63,14 kilómetros (1000 píxeles) (Figura 6 a).

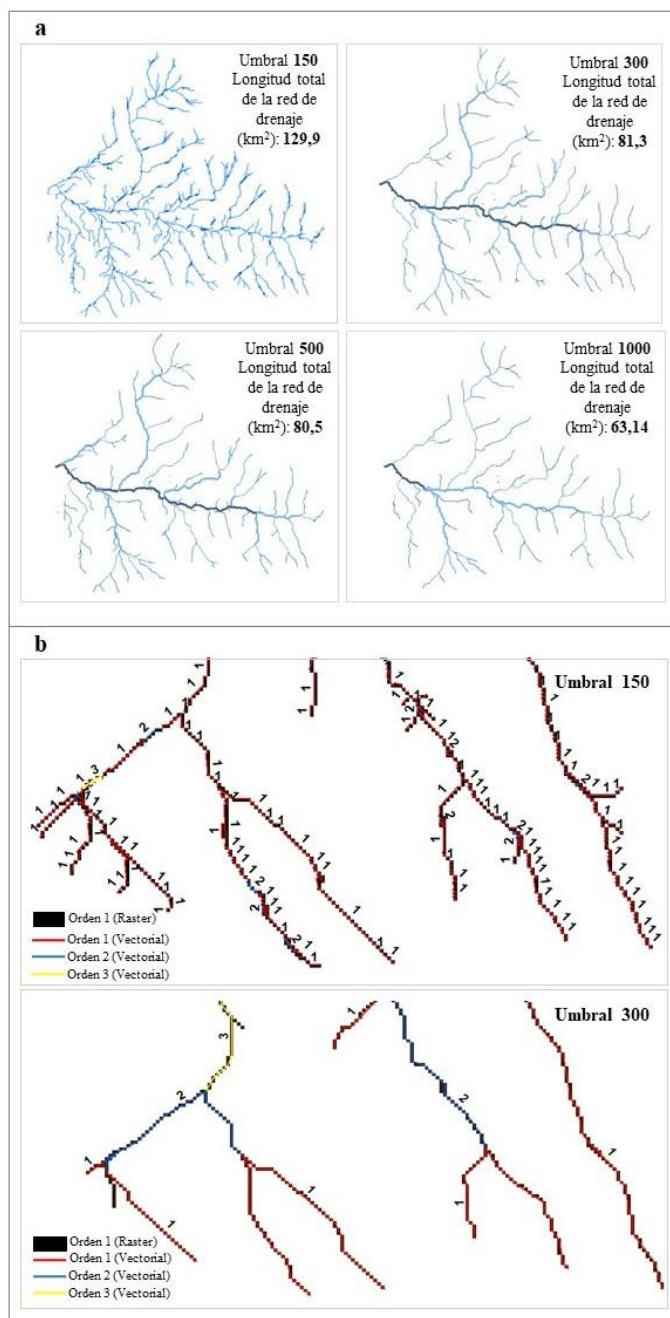


Figura 6. Longitud de las redes de drenaje en km² y determinación de segmentos de orden 1 según umbrales analizados.

Fuente. Elaboración propia.

La vectorización del modelo derivado del umbral de 150 píxeles no permitió obtener una coherencia tanto en las cantidades como en las longitudes de los cursos fluviales según sus órdenes: se obtuvo como resultado una red dividida en numerosos tramos cortos de orden 1 (Figura 6 b). Esto puede deberse al nivel de detalle derivado de la numerosa cantidad de píxeles utilizados en este umbral y por este motivo, para el análisis de los índices morfométricos, este resultado fue desestimado. Una vez seleccionados los modelos de redes de drenaje obtenidas a través de la selección de distintos umbrales—300, 500 y 1.000 píxeles—se procedió a extraer la información de las variables que fueron utilizadas para el cálculo de los índices morfométricos.

En la figura 7 se resumen los resultados obtenidos del cálculo de los índices morfométricos. Estos se dividieron entre aquellos que tienen en cuenta la frecuencia de tramos según orden (Figura 7 a) y

aquellos que consideran la longitud de tramos según orden (Figura 7 b). La relación de bifurcación (R_b), parámetro que relaciona la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato superior (Strahler, 1964), permite establecer un orden relativo entre cuencas de mayor o menor rapidez de propagación de la onda de crecida (Sala y Gay, 1981) lo que define su grado de peligrosidad. Los R_b promedio obtenidos para la cuenca según umbrales arrojaron los valores de 5,9, 5,2 y 6,2 píxeles. Se distingue que el índice disminuye su valor entre los 300 y los 500 píxeles y aumenta entre los 500 y los 1.000 píxeles. En términos cuantitativos esto se debe a la variación del número de tramos reconocidos de orden 1 y 2. Los valores superiores a 5, como es en este caso, indican una fuerte dependencia estructural y coincide con lo afirmado por Senciales González (1999) para áreas de fuertes pendientes, donde los segmentos se alargan de sobremanera, las relaciones de bifurcación superan ocasionalmente el valor de 5, sin embargo, se afirma también que no es usual hallar valores superiores a 6. En cuanto a las implicaciones hidráulicas y vinculado a las crecidas por concentración de la escorrentía, las áreas con alta relación de bifurcación indica una rápida concentración de la escorrentía, pero con picos de crecida poco importantes (Sala y Gay, 1981; Senciales González, 1999).

a					
Umbral	300	500	1000		
F_{d1}	2,3	3	1,5		
R_b umbral 300					
Orden	1	2	3	4	Total
Cantidad	81	68	8	1	158
R_b	1,1	8,5	8		5,9
R_b umbral 500					
Orden	1	2	3	4	Total
Cantidad	104	44	8	1	157
R_b	2,4	5,5	8		5,2
R_b umbral 1000					
Orden	1	2	3	4	Total
Cantidad	53	31	15	1	100
R_b	1,7	2	15		6,2

b					
RI umbral 300					
Orden	1	2	3	4	Media
Longitud (m)	39245,4	23647,9	11680,78	6745	
RI		0,6	0,5	0,6	0,5
RI umbral 500					
Orden	1	2	3	4	Media
Longitud (m)	39076,3	22221,2	12485,5	6738,3	
RI		0,5	0,5	0,5	0,5
RI umbral 1000					
Orden	1	2	3	4	Media
Longitud (m)	36400,8	18126,6	7102,7	1513,1	
RI		0,5	0,4	0,2	0,3
Umbral					
	300	500	1000		
D_d	2,3	2,3	1,8		
Umbral					
	300	500	1000		
C_t	5,4	6,8	2,7		

Figura 7. Índices morfométricos vinculados a: a) frecuencia de tramos según orden y b) longitudes de tramos según orden.

Fuente. Elaboración propia.

Por su parte, la frecuencia de drenaje (F_d) y la densidad de drenaje (D_d) son parámetros que pueden estar influenciados por diversas variables como, por ejemplo, los tipos de unidades litoestratigráficas o geomorfológicas, el porcentaje de extensión superficial de la roca de base, el relieve total, la distancia del punto más elevado a la divisoria, entre otros (Rabassa, 1982). La frecuencia de drenaje de los cauces elementales (F_{d1}) es la relación existente entre el número de cauces de orden 1 y el área de la cuenca. Según Senciales González (1999) este índice es más útil que F_d especialmente en áreas de alta bifurcación donde el número de cauces es muy elevado, como el caso de esta cuenca. Los valores obtenidos (2,3 - 3 - 1,5) expresan el número de cauces de primer orden por kilómetro cuadrado y señalan la intensidad o frecuencia de los procesos iniciales de arroyada permitiendo inducir las posibles causas cuando se lo relaciona con otros factores del medio como la cubierta vegetal o la agresividad de las precipitaciones (Strahler, 1964).

La densidad de drenaje (D_d) fue definida por Horton (1945) como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca respecto a su área. Es considerada uno de los parámetros más importantes en el análisis morfométrico porque revela el estado erosivo de la red hidrográfica y relaciona forma y procesos de un modo claro y directo (Senciales González, 1999). Horton (1945) considera a la D_d como un buen indicador de las diferencias de relieve, de la capacidad de infiltración del suelo y de la resistencia inicial del terreno a la erosión. Strahler (1964) agrega, además, que la D_d está controlada por el tipo de litología y por la presencia o ausencia de vegetación. Puede considerarse también que, a mayor densidad de drenaje, menor tiempo de escorrentía lo cual puede ser

usado también como un indicador de peligrosidad (Camino *et al.*, 2018). Para el área de estudio los valores obtenidos fueron de 2,3 km/km² para el umbral de los 300 píxeles, 2,3 km/km² para los 500 y 1,8 km/km² para el umbral de 1.000 píxeles. Estos resultados, referidos a kilómetros de cauce por unidad de superficie, indican según Senciales González (1999) una baja densidad de drenaje, lo que suele darse en zonas con gran masividad litológica y espesa cobertura vegetal, características presentes en el área. En cuanto a la implicancia respecto a la escorrentía, una alta proporción de drenaje supone una concentración paulatina de las aguas; en contrapartida, valores bajos, como en este caso, una baja proporción de cauces, concentra todos los caudales en los colectores principales, generando un volumen de caudal elevado, y por lo tanto crecidas repentinas.

La densidad de drenaje es considerada el parámetro más influenciado por la escala de trabajo, lo que eventualmente influye en la determinación de la peligrosidad de la cuenca. Para Senciales González (1999) trabajar con fuentes de baja resolución implica una baja precisión en la medición y, sobre todo, la supresión de gran número de cauces de primer orden, lo que supone un importante porcentaje dentro del total de cauces en una red de drenaje. Los cauces de orden 1 son los cursos fluviales que mayor influencia tienen en la generación de flujos torrenciales y de crecidas repentinas (Gil, Volonté y Campo, 2019). Distintos autores demostraron diferencias significativas en los índices obtenidos según las escalas utilizadas: Gil *et al.*, (2019) señalan variaciones entre 1,9 y 3,6, mientras que los valores calculados por Moretto *et al.*, (2019) varían de 1,7 a 2 según sea la escala utilizada. Si bien la densidad de drenaje se encuentra condicionada por el clima, el tipo de vegetación y la litología (Senciales González, 1999), en este caso particular la utilidad de este índice radica en mostrar las diferencias de los resultados obtenidos según las escalas utilizadas que reflejan una disminución del valor del índice cuando aumenta el número del umbral.

El coeficiente de torrencialidad (C_t) multiplica la densidad de drenaje (D_d) por la frecuencia de drenaje (F_d) y es un indicador que está relacionado con los procesos de erosión lineal y con la capacidad de descarga de la cuenca entendiendo que, a mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Díaz y López Bermúdez, 1987; Senciales González, 1999). Los cursos de primer orden, son de génesis erosiva, por lo que altos valores de C_t , revelan menos tiempos de llegada al pico de crecida, mayor torrencialidad de la cuenca, mayor capacidad de carga y una alta susceptibilidad a la erosión (Romero Díaz y López Bermúdez, 1987). De los resultados de la totalidad de los índices obtenidos, se destaca que el C_t en particular, es el índice que mayor dispersión posee. Por su parte, la relación de longitud (R_l) que es definida como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato superior, no presenta variación entre el umbral de 300 y de 500 píxeles (0,5) pero si respecto al umbral de los 1.000 píxeles (0,3). Valores altos de R_l revelan una concentración paulatina de caudales a lo largo del colector principal, mientras que bajas relaciones muestran mayor energía concentrada bruscamente (Senciales González, 1999). La variación obtenida en estos resultados se justifica por el aumento de la cantidad de número de segmentos de órdenes superiores y la longitud de los mismos y responde al igual que el resto de los índices, al cambio en la definición de los cursos determinada por la utilización de los diferentes umbrales. Cabe destacar que en algunos casos los valores de los índices no aumentan o disminuyen de manera proporcional según el umbral y esto puede deberse a que en la determinación de las cantidades y longitudes de las redes de drenaje influyen también otros factores como la litología, la vegetación, el suelo, ext.

Los modelos obtenidos reflejan la incidencia que ejerce la utilización de los distintos umbrales en la definición tanto del número de tramos de cauce como en la longitud de los mismos. Desde el punto de vista metodológico, el umbral condiciona la escala de trabajo porque es a partir de este dato de entrada que se definirá una determinada red. Diversos autores han destacado la importancia de considerar la escala de trabajo en este tipo de estudios porque es a partir de aquí que se determinará con mayor rigor posible la red de la cual se obtendrán los datos de entrada para el cálculo de los índices morfométricos (Senciales González, 1999; Moretto *et al.*, 2018; Moretto *et al.*, 2019; Gil, Volonté & Campo, 2019). Respecto a los índices, cabe destacar que, una descripción de los mismos sin ponerlos en relación, no sería tarea suficiente para alcanzar conclusiones que permitan la interpretación conjunta de los resultados morfométricos en una cuenca (Senciales González, 1999). El análisis conjunto de los indicadores morfométricos permite llevar a cabo una evaluación desde el punto de vista de la

peligrosidad de las inundaciones en cuencas no aforadas. Sin embargo, para que estos cálculos sean representativos del comportamiento hidrológico real de la cuenca, los datos de entrada deben tener la mayor precisión posible, ya que de ellos depende el número y longitud de los cursos de orden 1 los que a su vez influyen en el orden jerárquico de la cuenca. Esto quedó demostrado en los diferentes resultados obtenidos según el umbral utilizado para obtener las redes de drenaje lo que repercute en el cálculo de los índices morfométricos.

5. Conclusiones

Este estudio consistió en la aplicación de una metodología para la extracción automática de la red de drenaje de la cuenca alta del arroyo La Ventana a través de la utilización de un MDS con especial importancia de la localización del inicio de los cauces. Se comprobó la importancia de la elección de un umbral óptimo para la obtención del modelo de drenaje más acorde con la realidad y a partir del cual se puedan extraer datos válidos y concretos para su utilización en el cálculo de los índices morfométricos de la cuenca. El análisis morfométrico surgió como una herramienta de constatación del comportamiento fluvial de cada uno de los modelos obtenidos.

A través del análisis y comparación de resultados obtenidos de distintas fuentes de datos y metodologías de comprobación, se logró establecer que si bien, para el caso particular del área de estudio, el umbral de 150 píxeles resultó óptimo en la aproximación de los inicios de cauces a la realidad, no pudieron obtenerse datos cuantitativos coherentes para los cálculos de los índices morfométricos. La red obtenida mediante el umbral de 500 píxeles es el modelo del cual se lograron obtener datos precisos. Por ello se concluye que la utilización de un determinado umbral estará en función del objetivo del trabajo propuesto.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el PGI-UNS "Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas ambientales a diferentes escalas témporo-espaciales" (24/G092). Se agradece al señor Roberto Martínez por brindar la posibilidad de acceso al sector de muestreo.

Referencias bibliográficas

- Ariza-Villaverde, A. B., Jimenez-Hornero, F. J., Gutiérrez de Ravé, E. (2013): "Multifractal analysis applied to the study of the accuracy of DEMbased stream derivation", *Geomorphology*, 197, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.040>
- Cabrera, A.L. (1976). *Regiones fitogeográficas argentinas*. En: Parodi LR (ed) Enciclopedia Argentina de agricultura y ganadería, tomo 2. Buenos Aires. Ed. ACME.
- Camino, M.A., Bó, M.J., Cionchi, J.L., López de Armentia, A., Del Río, J.L., y De Marco, S.G. (2018): "Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)", *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73-97.
- Campo de Ferreras, A.M., Capelli de Steffens, A., y Diez, P. G. (2004). *El clima del Suroeste bonaerense*. Bahía Blanca. Ediuns.
- Campo, A.M., Ramos, M.B., y Zapperi, P.A. (2009). Análisis de las variaciones anuales de precipitación en el suroeste bonaerense, Argentina. XII Encuentro de Geógrafos de América Latina, 12.
- Casado, A. L., Gil, V., y Campo, A. M. (2007). "Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario. Buenos Aires, Argentina", *Revista Huellas*, 11, 9-26. <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/2561>
- Casado, A., y Campo, A. M. (2019). "Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos. estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina", *Cuadernos Geográficos*, 22, 1–2, 6–26. <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>

Cazzador, D.O., Rainato, R., Mao, L., Martini, L., y Picco, L. (2021). "Coarse sediment transfer and geomorphic changes in an alpine headwater stream", *Geomorphology*, 376, 107569.

Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Londres y Nueva York. Routledge.

Dietrich, W. E., Wilson, C. J., Montgomery, D. R., McKean, J., y Bauer, R. (1992). "Erosion thresholds and land surface morphology", *Geology*, 20, 8, 675–679.

Dietrich, W. E., y Dunne, T. D. (1993). The channel head. In K. Beven y M. J. Kirkby (Eds.), *Channel Network Hydrology*. John Wiley.

Epuh, E.E., Moshood, A.I., Okolie, C.J., Daramola, O.E., Akinnusi, S.A., Arungwa, I.D., Orji, H. y Olanrewaju, A.A. (2022). "Integration of satellite gravimetry, multispectral imagery and digital elevation model for investigating crustal deformation in the Niger Delta Basin", *Geosystems and Geoenvironment*, 1-15.

Frangi, J.L. y Bottino, O. (1995). "Las comunidades vegetales de la sierra de la Ventana", *Revista de la Facultad Agronomía*, Universidad Nacional de la Plata, 71, 93–133

Gentili, J., Campo, A. y Gil, V. (2011). "Distribución espacial y temporal de las precipitaciones en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania". *Actas Congreso Nacional de Geografía*. Mar del Plata.

Gentili, J.O. (2012). *Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada a peligro de inundaciones y anegamientos*. Tesis Doctoral en Geografía. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Gentili, J.O., y Gil, V. (2013). "Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina", *Revista Universitaria de Geografía*, 22, 2, 147-166.

Gil, V. (2010). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de Crecidas*. Tesis de Doctoral en Geografía. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Gil, V., Volonté A. y Campo, A.M. (2019). "Índices morfométricos a diferentes escalas aplicados al peligro de crecidas en cuencas pequeñas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Argentina", *Revista Brasileira de Geomorfología*, 2, 4.

Gomi, T., Sidle, R.C., y Richardson, J.S. (2002). "Understanding processes and downstream linkages of headwater systems: headwaters differ from downstream reaches by their close coupling to hillslope processes, more temporal and spatial variation, and their need for different means of protection from land use", *BioScience*, 52, 10, 905–916. DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0905:UPADLO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0905:UPADLO]2.0.CO;2)

Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid. Editorial Pearson.

Hancock, G.R., y Evans, K.G. (2006). "Channel head location and characteristics using digital elevation models", *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 7, 809–824. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1285>

Henkle, J.E., Wohl, E., y Beckman, N. (2011). "Locations of channel heads in the semiarid Colorado Front Range, USA", *Geomorphology*, 129, 3–4, 309–319.

Horton, R.E. (1945). "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology", *GSA Bulletin*, 56, 3, 275–370.

Howard, A.D. (1967). "Drainage analysis in geologic interpretation: a summation". *Bull. AAPG*, 51, 2246–2259.

Jaeger, K.L., Montgomery, D.R., y Bolton, S.M. (2007). "Channel and perennial flow initiation in headwater streams: Management implications of variability in source-area size", *Environmental Management*, 40, 5, 775–786. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0311-2>

Jenson, S.K., y Domingue, J.O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis", *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54, 11, 1593-1600.

- Kale, R.V., Jose, P. G., Taloor, A.K., y Kumar, R. (2022). *Assessment of Digital Elevation Models Based on the Drainage Morphometric Parameters for the Tawi River Basin*. Singapore, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4_10
- Kok, K., Mohd Sidek, L., Jung, K., y Kim, J.C. (2018). “Analysis of runoff aggregation structures with different flow Direction Methods under the framework of power law distribution”, *Water Resources Management*, 32, 14, 4607–4623.
- Li, J., Li, T., Zhang, L., Sivakumar, B., Fu, X., Huang, Y., y Bai, R. (2020): “A D8-compatible high-efficient channel head recognition method”, *Environmental Modelling & Software*, 125, 2-13.
- Lindsay, J.B., y Seibert, J. (2013). “Measuring the significance of a divide to local drainage patterns”, *International Journal of Geographical Information Science*, 27, 7, 1453–1468. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.705289>
- López-Vicente, M., Pérez-Bielsa, C., López-Montero, T., Lambán, L.J., y Navas, A. (2014). “Runoff simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially distributed and open-source model”, *Environmental Modelling and Software*, 62, 11–21.
- Maidment, D.R. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI, Inc.
- Manfreda, S., Di Leo, M., y Sole, A. (2011). “Detection of flood-prone areas using digital elevation models”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16, 10, 781. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367)
- Montgomery, D.R., y Buffington, J.M. (1993). “Channel Processes, classification, and response. In Channel classification, prediction of channel response, and assessment of channel condition”.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1988). “Where do channels begin?”, *Nature*, 336, 232–234.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1989). “Source areas, drainage density, and channel initiation”, *Water Resources Research*, 25, 8, 1907–1918.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1992). “Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale”, *Science*, 255, 46, 826–830.
- Montgomery, D.R., y Foufoula-Georgiou, E. (1993). “Channel network source representation using digital elevation models”, *Water Resources Research*, 29, 12, 3925–3934.
- Moretto, B., Gentili, J. O. y Campo, M.A. (2018). Morfometría fluvial. Análisis multiescalar preliminar en subcuencas del arroyo Sauce Corto. Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM. Mendoza, Argentina.
- Moretto, B., Gentili, J.O. y Campo, M.A. (2019). “Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)”, *Revista Huellas*, 23, 2, 149-167.
- Munro, S.E. (2010). *El río y la forma*. Introducción a la geomorfología fluvial. Santiago de Chile. Ril Editores.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Sidorchuk, A., y Torri, D. (2002). “Prediction of concentrated flow width in ephemeral gully channels”, *Hydrological Processes*, 16, 10, 1935–1953.
- Ngula Niipele, J., y Chen, J. (2019). “The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin”, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>
- Nikolakopoulos, K.G., Choussiafis, C., y Karathanassi, V. (2015). “Assessing the quality of DSM from ALOS optical and radar data for automatic drainage extraction”, *Earth Science Informatics*, 8, 2, 293–307.
- Niyazi, B., Zaidi, S., y Masoud, M. (2019). “Comparative study of different types of digital elevation models on the basis of drainage morphometric parameters (case study of Wadi Fatimah Basin, KSA)”, *Earth Systems and Environment*, 3, 3, 539-550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00111-2>
- Romero Díaz, M.A. y López Bermúdez, F. (1987). “Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir”, *Papeles de Geografía*, 12, 47-62.

Roy, S.K., Chowdhury, M.A., Talukdar, S., Billah, M.M., Banik, A. C. y Mallick, J. (2022). “Comparisons of Watershed Delineation of River Network Representation and Morphometric Analysis in Karnaphuli River Basin, Chittagong, Bangladesh: A study with Different Digital Elevation Model (DEM). DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1243899/v1>

Sala, M. y Gay, R. (1981). “Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena”, *Notas de Geografía Física*, 4, 41-65.

Samela, C., Manfreda, S., Paola, F.D., Giugni, M., Sole, A., y Fiorentino, M. (2016). “DEM-based approaches for the delineation of flood-prone areas in an ungauged basin in Africa”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 21, 2, 1-10.

Sellés-Martínez, J. (2001). “Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires, Argentina)”, *Journal of Iberian Geology*, 27, 43-69 pp.

Senciales González, J.M. (1999). *Redes fluviales. Metodología de análisis*. Málaga.

Shavers, E., y Stanislawski, L.V. (2020). “Channel cross-section analysis for automated stream head identification”, *Environmental Modelling y Software*, 132, 10-48.

Strahler, A.N. (1964). *Geografía Física*. Barcelona: Omega.

Tarolli, P., y Dalla Fontana, G. (2009). “Hillslope-to-valley transition morphology: New opportunities from high resolution DTMs”, *Geomorphology*, 113, 1-2, 47-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.006>

Volonté, A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina*. Tesis Doctoral en Geografía. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Willgoose, G., Bras, R.L., y Rodriguez-Iturbe, I. (1991). “A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 1. Theory”, *Water Resources Research*, 27, 7, 1671-1684.

Willgoose, G., Bras, R.L., y Rodriguez-Iturbe, I. (1992). “The relationship between catchment and hillslope properties: implications of a catchment evolution model”, *Geomorphology*, 5, 1-2, 21-37.

Wilson, J. P. (2012). “Digital terrain modeling”, *Geomorphology*, 137, 1, 107-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>

Wohl, E. (2018): “The challenges of channel heads”, *Earth-Science Reviews*, 185, 649-664. c