



Análisis morfométrico de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande (Argentina) aplicado a la susceptibilidad de generar crecidas fluviales

Morphometric analysis of the Cura Malal Grande basin (Argentina) applied to the potentiality to generate floods

Historial del Artículo

Recibido:

29 de marzo de 2023

Revisado:

27 de noviembre de 2023

Aceptado:

14 de diciembre de 2023

María de los Ángeles Ortuño-Cano^a, Jorge Osvaldo Gentili^b

^a Filiación: Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Correo: maria.ortuno@uns.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9146-7105>

^b Filiación: Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Correo: jgentili@uns.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-4667>

Palabras clave

cuenca, hidrología, morfometría fluvial, Sistema de Ventania

RESUMEN

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica y sus subcuencas son importantes en la realización de estudios geomorfológicos e hidrológicos ya que influyen en el desarrollo de múltiples procesos fluviales, como la generación de crecidas y eventuales inundaciones. El objetivo del trabajo es estudiar la morfometría fluvial de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande como insumo para la evaluación de la susceptibilidad de generar crecidas. La cuenca no cuenta con estaciones de aforo ni información sobre su morfometría. El sistema hidrológico se ubica en la vertiente norte del Sistema de Ventania donde recurrentemente suceden eventos de precipitación intensa. Para el análisis del sistema se determinaron sus subcuencas, obteniéndose los parámetros de medición directa de cada una y, en función de estos, diversos índices morfométricos para establecer relaciones respecto de la respuesta hidrológica probable de la cuenca. Los resultados permiten inferir que en las subcuencas *C* y *NO* es posible esperar una mayor energía concentrada y una rápida respuesta ante eventos de precipitación intensa. Para la cuenca alta en su conjunto, se espera como respuesta hidrológica ante la ocurrencia de eventos precipitación intensa, tiempos de concentración cortos y por lo tanto una rápida afluencia hacia el curso principal del arroyo que puede generar inundaciones en áreas rurales aguas abajo del punto de cierre de la cuenca alta. Los resultados constituyen una línea de base para la continuidad de estudios morfométricos y de amenaza frente a inundaciones en el área.

Keywords

basin, fluvial morphometry, hydrology, Ventania System

ABSTRACT

The morphometric properties of a river basin and its sub-basins are important in carrying out geomorphological and hydrological studies since they influence the development of multiple fluvial processes, such as the generation of floods and eventual floods. The objective of the work is to study the fluvial morphometry of the upper basin of the Cura Malal Grande stream as an input for the evaluation of the susceptibility to generating floods. The basin does not have gauging stations or information on its morphometry. The hydrological system is located on the northern slope of the Ventania System where intense precipitation events occur recurrently. For the analysis of the system, its subbasins were determined, obtaining the direct measurement parameters of each one and, based on these, various morphometric indices to establish relationships with respect to the probable hydrological response of the basin. The results allow us to infer that in the *C* and *NO* sub-basins it is possible to expect greater concentrated energy and a rapid response to intense precipitation events. For the upper basin as a whole, a hydrological response to the occurrence of intense precipitation events, short concentration times and therefore a rapid influx towards the main course of the stream is expected, which can generate flooding in rural areas downstream from the point of closure of the upper basin. The results constitute a baseline for the continuity of morphometric and flood threat studies in the area.

Introducción

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica, independientemente de su escala, son importantes en la realización de estudios geomorfológicos e hidrológicos ya que influyen en su comportamiento morfodinámico y respuesta hidrológica frente a eventos de crecidas (Busnelli & Horta, 2014; Méndez & Marcucci, 2006). Las crecidas se definen como eventos temporales propios de un sistema fluvial con caudales anormalmente altos que de manera periódica o excepcional registra un punto o tramo de la corriente y su origen se relaciona con precipitaciones generalizadas y de larga duración o la fusión progresiva de nieve y deshielo glaciar (Díez Herrero et al., 2008). El aumento de caudal por encima de la capacidad del cauce conlleva al desborde y la ocupación de los márgenes dando lugar a la ocurrencia de inundaciones. La inundación implica la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia del aporte inusual y repentino de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada (Díez Herrero et al., 2008).

El estudio del conjunto de factores que intervienen en una cuenca es elemental para comprender su configuración geomorfológica general (Pedraza-Gilsanz, 1996). La descripción precisa de la geometría de las formas superficiales posibilita la comparación entre cuencas y la inferencia del desarrollo de múltiples procesos fluviales. Strahler (1964) explica que la morfometría fluvial se refiere a las medidas de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial considerando a la cuenca de drenaje como un sistema geométrico plano y que con su análisis se pretende cuantificar la evolución en el paisaje fluvial y evaluar su estado erosivo. Al mismo tiempo, es necesario estudiar la morfología y las relaciones proceso-forma (Gutiérrez-Elorza, 2008). El relieve, por su altitud o disposición, puede inducir situaciones meteorológicas que favorezcan las precipitaciones intensas y/o abundantes (Díez Herrero et al., 2008). El tamaño, la forma (elongación o circularidad), la compacidad y la pendiente actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento, influyendo en los procesos de escurrimiento o retención superficial, infiltración y evaporación (Díez Herrero et al., 2008; Senciales-González, 1999). El análisis morfométrico, además de la cuenca, debe considerar los cauces ya que son las áreas donde la energía se concentra y es a través de ellos donde discurre el caudal y la carga de sedimentos, por lo que el estudio de la red de drenaje resulta básico para contribuir al estudio del movimiento y captación de agua de lluvia (Senciales -González, 1999).

Entre las primeras investigaciones referentes a la caracterización morfométrica de cuencas de drenaje se encuentran las de Horton (1932, 1945), Schumm (1956) y Strahler (1957). En la actualidad, existen diversos índices útiles para describir cuantitativamente los factores morfológicos de las cuencas con diversos fines, entre ellos, el estudio de crecidas potenciales e inundaciones consecuentes.

A nivel internacional, múltiples autores han aplicado el análisis morfométrico para el estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas. En España, Romero Díaz & López Bermúdez (1987) analizaron parámetros morfométricos del río Guadiana Menor, Díez Herrero (2008) caracterizó morfométricamente la cuenca hidrográfica del río Alberche mediante Sistemas de Información Geográfica y Ollero Ojeda et al. (2011) propusieron indicadores útiles y relevantes en estudios de la geomorfología fluvial vinculados a “morfometría del cauce”, “actividad de procesos de erosión y sedimentación”, entre otros. En la actualidad, la metodología continúa empleándose en diversas regiones del mundo. Existen estudios realizados en Nepal (Subedi, & Tamrakar, 2020), Etiopía (Asfaw Workineh, 2019), Irak (Fayyad, & Al-Akam, 2021) e India (Kamble et al., 2022; Varshney, & Shukla, 2022) que estudian morfométricamente diferentes cuencas hidrográficas y sus respuestas a los procesos hidrológicos. En América, Costa (1987) analizó la morfometría en cuencas pequeñas de Estados Unidos y su relación con las inundaciones que ocurren en la región. Entre los estudios más actuales se encuentran los realizados en México (Guevara Gutiérrez et al., 2019; Tomé Hernández, 2022), Costa Rica (Ramírez Granados & Alfaro Jiménez, 2018), Brasil (Veneziani et al., 2019) y Ecuador (Caicedo Toro et al., 2021; Shagui Miranda et al., 2021) vinculados con la ocurrencia de inundaciones como insumo para la planificación y gestión.

En Argentina, Díaz Gómez et al. (2017) y Aumassanne et al. (2018) estudiaron cuencas subtropicales del noroeste argentino y del río Colorado respectivamente. Esper Angillieri et al. (2016) estudiaron la morfometría de la cuenca del río del Agua, San Juan, como base para la evaluación de la susceptibilidad de aluviones. Vich et al. (2020) analizaron morfométricamente (geometría, relieve y red de drenaje) 34 subcuencas de la ciudad de Mendoza. En la provincia de Buenos Aires, Campo et al. (2012) aplicaron métodos de análisis morfométricos en una cuenca urbana ubicada en Ingeniero White. En los sectores serranos de la provincia de Buenos Aires desde hace tiempo diversos autores aplican índices morfométricos a las cuencas de la región. Camino et al. (2018) realizaron estudios morfométricos para doce cuencas de drenaje del sureste de la provincia de Buenos Aires ubicadas en la

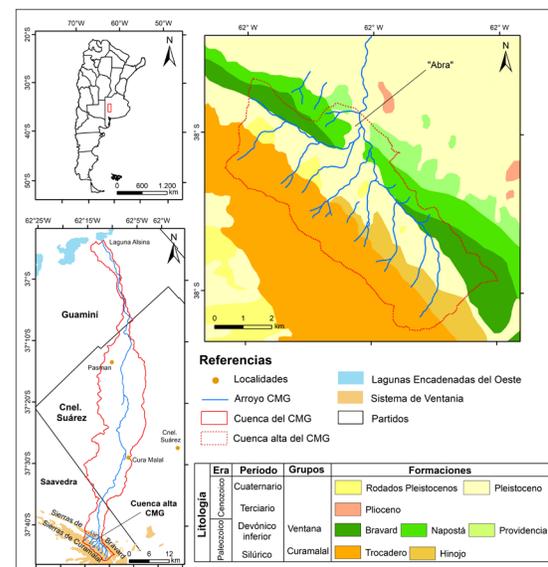
vertiente sur del Sistema de Tandilia. Gil et al. (2009) evaluaron la influencia de la litología en la morfometría de subcuencas de las cabeceras del río Sauce Grande y el arroyo Sauce Corto. Navarro & Cano (2017) realizaron un estudio comparativo entre estas últimas y la cuenca del arroyo Napostá. Por otra parte, Moretto et al. (2019) y Gil et al. (2019) aplicaron índices morfométricos de manera multiescalar para la cuenca alta del arroyo Sauce Corto y para la cuenca del arroyo San Bernardo respectivamente.

En la vertiente norte del Sistema de Ventania se ubica la cuenca del arroyo Cura Malal Grande donde los eventos de precipitación intensa son recurrentes y dan lugar a crecidas. Estas crecidas, en reiteradas oportunidades, derivaron en inundaciones a lo largo de toda la cuenca que afectaron a la población, su infraestructura y a la agricultura y ganadería, principales actividades económicas de la región (Ortuño Cano et al., 2019). Dado que la cuenca no se encuentra aforada, y ante la existencia de la problemática mencionada, los estudios morfométricos resultan una aproximación válida para el entendimiento de la respuesta hidrológica de la cuenca ante la ocurrencia de estos eventos. La cuenca no cuenta al presente con estudios referidos a sus características morfométricas a nivel de cuenca y subcuencas, sino que los estudios existentes la describen a una escala regional dentro del complejo lagunar Encadenadas del Oeste (Brieva, 2018). Ante la situación descrita, el objetivo del trabajo es estudiar la morfometría fluvial de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande como insumo para la evaluación de la susceptibilidad de generar crecidas. Este análisis resulta indispensable, en el marco de la gestión del riesgo de desastres, para inferir la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de abundante precipitación y la amenaza de inundaciones en los diferentes sectores de la misma. El abordaje de esta problemática representa un aporte para la planificación y ordenamiento territorial y la adecuada gestión del recurso hídrico superficial desde la perspectiva de la Geografía y en particular de la Geografía Física Aplicada (Campo, 2015; Capitanelli, 1998).

Área de estudio

La cuenca del arroyo Cura Malal Grande (CMG) se encuentra ubicada en la vertiente norte del Sistema de Ventania en el suroeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Dicho arroyo, junto a otros que se originan en la vertiente norte, drenan sus aguas por la llanura bonaerense hasta la depresión de las Lagunas Encadenadas del Oeste. En su recorrido atraviesa los partidos (división político-administrativa asociada a municipios) de Saavedra, Coronel Suárez y Guaminí (Figura 1).

Figura 1. Área de estudio



Fuente: elaboración propia sobre la base de cartas geológicas escala 1:200.000 Sierras de Curamalal y de la Ventania (Harrington, 1947).

Von Gosen, et al. (1990) consideraron al Sistema de Ventania como una faja plegada y corrida con diversos mecanismos de deformación. Los cordones que lo conforman corresponden a un sistema de sierras de pliegues, de tectónica compleja que ha sufrido diversas etapas erosivas (González Uriarte et al., 1988). El conjunto se caracteriza por tener relieve abrupto con cordones bien definidos y laderas de moderada a fuertes pendientes (Harrington, 1947). La cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande se desarrolla entre las sierras de Curamalal y Bravard. Esta última se encuentra interrumpida transversalmente por un profundo valle de relieve abrupto denominado localmente "abra" (Harrington, 1947) (Figura 1). En sus nacientes, el arroyo discurre por afloramientos rocosos de los grupos Cura Malal y Ventania –en orden ascendente del orden de la columna estratigráfica–, ambos compuestos por diversas cuarcitas de características semejantes (Harrington, 1947). Las diferencias en los grupos están dadas principalmente por las características de la litología, la magnitud de los depósitos pefíticos basales, la abundancia de bioturbación y la proporción de pelitas y el grado de deformación que presentan (Sellés-Martínez, 2001).

En cuanto a las formaciones litológicas, en sentido ascendente de la columna estratigráfica, se encuentran Fm. Trocadero y Fm. Hinojo del Grupo Cura Malal y Fm. Bravard, Fm. Napostá y Fm. Providencia del Grupo Ventania. La Fm. Trocadero es la más importante

de la cuenca alta, alcanza los 800 m de espesor y está constituida por areniscas cuarcíticas de grano fino, de colores variados. La Fm. Hinojo se encuentra compuesta por areniscas cuarcíticas compactas y esquistosas. Entre las que conforman el Grupo Ventana se destaca la Fm. Bravard por su extensión en la cuenca alta, que está compuesta por unos 200 a 250 m de areniscas gruesas hasta conglomerádicas, de colores rojizos, rosados y pardos. En menor proporción se encuentran la Fm. Napostá y Fm. Providencia constituidas por ortocuarcitas muy homogéneas, de grano fino a muy fino, macizas y densas, en el primer caso y por ortocuarcitas en el segundo caso. En menor medida también existen depósitos de rodados de diferente edad, principalmente en el valle interserrano (Figura 1) (Harrington, 1947).

La región del suroeste bonaerense, localizada en la franja de los climas templados presenta temperaturas anuales medias que oscilan entre 14 °C y 20 °C (Campo et al., 2004). La alternancia de períodos húmedos y secos son parte de la variabilidad pluviométrica natural del área. Las precipitaciones guardan relación con diferentes factores como la continentalidad y la exposición a las masas de aire dominantes, entre otros, y se caracterizan por ser altamente dinámicas en el espacio y en el tiempo (Casado & Campo, 2019). Además, la presencia de las sierras en el área provoca cambios en el comportamiento y los montos de las precipitaciones (Gentili & Gil, 2013) debido a que se genera una sobreexcitación orográfica de las precipitaciones del orden de los 110 mm (Zapperi et al., 2007). En Coronel Suárez (Servicio Meteorológico Nacional), el registro de lluvias histórico promedio entre 1951-2020 fue de 730,4 mm. Durante la ocurrencia de eventos de precipitaciones suelen registrarse crecidas de los ríos y arroyos en toda la zona serrana que pueden dar lugar a inundaciones (Casado y Campo, 2019; Gentili, 2012). En Cura Malal, la precipitación media para el período 2015-2020 fue de 712 mm con un valor mínimo de 480 mm en 2019 y un máximo de 997 mm en 2017 (según datos obtenidos de la Red de Estaciones Meteorológicas de la Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca). Desde 2011 se identificaron ocho eventos de inundación de diferente magnitud (2011, 2014 –julio y octubre–, 2016, 2017, 2018 y 2020 –abril y julio–) que ocasionaron consecuencias a lo largo de toda la cuenca. En la inundación de septiembre de 2017 se registraron 90 mm en un día que provocaron afectaciones vinculadas principalmente a la circulación de la población, debido a la intransitabilidad de los caminos y rutas, y a las consecuencias que se generan en la actividad agrícola-ganadera (retrazo y pérdida de cosecha), lo que trajo inconvenientes económicos para los productores de toda la región (Ortuño Cano et al., 2019).

En el área de la cuenca, la población total es de 1.055 habitantes los cuales se ubican mayormente de manera dispersa y en menor medida en las localidades rurales de Cura Malal (95 habitantes) y Pasma (165 habitantes) ambas del partido de Coronel Suárez (ubicadas en los sectores medio y bajo de la cuenca respectivamente) (Figura 1). Sobre la cuenca alta predomina la población rural con estancias destinadas a la actividad turística y dedicadas a la agricultura y ganadería principalmente.

Materiales y métodos

El análisis se realizó a partir de cartas topográficas a escala 1:50.000, fuente de mayor detalle y de cobertura continua para el área de estudio generadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) organismo rector nacional en la materia. Se digitalizaron y se georreferenciaron las cartas topográficas Saavedra (3763-35-1) y Estancia Los Moros (3763-35-2) y se vectorizaron las curvas de nivel con la equidistancia correspondiente a cada hoja topográfica (5-10 m y 5m respectivamente) y los puntos acotados. Con este material y haciendo uso de la herramienta de interpolación *Topo to Raster* (ArcGIS 10©), se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 12,5 m de resolución.

A partir de esto, se delimitó de forma manual –mediante el método de Heras (1982)– y de forma automática con ArcGIS 10© (a partir de los módulos Arc Hydrology y Spatial Analysis y la herramienta Terrain Preprocessing siguiendo la secuencia de procesos: Fill Sink, Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Definition, Stream Segmentation y Batch Watershed Delineation) la cuenca hidrográfica y las respectivas subcuencas arribando con ambos métodos al mismo resultado. Asimismo, la red de drenaje se vectorizó por segmentos desde las cartas topográficas mencionadas y se jerarquizó siguiendo el método de Strahler (1964). Las subcuencas de la cuenca alta del arroyo, unidades diagnóstico para el análisis morfométrico, fueron nombradas: Norte (N), Noroeste (NO), Centro (C) y Suroeste (SE) dado que las mismas no poseen nombres definidos en la cartografía oficial.

Para el análisis de la morfometría fluvial se agruparon los parámetros e índices considerados en las siguientes categorías: tamaño y forma, hipsometría y pendientes y red hidrográfica (Tabla 1). El análisis de la hipsometría se complementó con el estudio de la frecuencia altimétrica y las geoformas asociadas en función de Pereyra & Ferrer (1995), Pereyra et al. (2001) y las Cartas Geológicas de escala 1:200000 Sierras de Curamalal y de la Ventana (Harrington, 1947).

En función de los parámetros de medición directa se calcularon los índices morfométricos para el análisis de las diferentes categorías, que influyen en las abstracciones de los parámetros hidrológicos iniciales y la magnitud de los tiempos característicos de las relaciones hidrográficas (Díez Herrero, 2008): Razón de elongación (R_e), Coeficiente de compacidad (K_c), Tiempo de concentración (T_c), Razón de relieve (R_r), Razón de bifurcación (R_b), Relación de longitud (R_l), Razón de superficie (R_a), Densidad de drenaje (D_d), Frecuencia de drenaje (F_d) y el Coeficiente de torrencialidad (C_t) (Tabla 1).

Tabla 1
Parámetros e índices morfométricos analizados

Categorías	Parámetros	Índices morfométricos			
		Nombre	Fórmula	Definición	Descripción
Tamaño y forma	Área de la cuenca	Razón de elongación (R_e)	$R_e = (1,129\sqrt{A})/L_{max}$	A: Área L _{max} : Longitud del curso principal	Re: este índice consiste en la relación entre el diámetro de un círculo con el área de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma (Schumm, 1956).
	Perímetro	Coeficiente de compacidad (K_c)	$K_c = 0,28 \cdot P / (\sqrt{A})$	P: Perímetro	K _c : índice de Gravelius (1914), cociente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área.
	Longitud del curso principal	Tiempo de concentración (T_c)	$T_c = 0,95(L_{max}^3/H)^{0,385}$	H: Desnivel	T _c : tiempo que demoran todos los puntos de una cuenca en aportar agua de escorrentía, de forma simultánea, al punto de salida de la cuenca (Fórmula de la División California of Highways and Publics Works de USA).
Hipsometría y pendientes	Altura máxima, mínima y media Desnivel absoluto. Pendiente media de la cuenca	Razón de relieve (R_r)	$R_r = D/L_c$	D: desnivel Absoluto L _c : longitud de la cuenca	R _r : permite conocer la existencia de áreas con gran velocidad de caudales (Schumm, 1956).
Red hidrográfica	Orden de la cuenca	Razón de bifurcación (R_b)	$R_b = N_u/N_{u+1}$	N _u : número de orden	R _b : los valores varían entre 2 y 5. Indica la forma del sistema de drenaje. Altas R _b indican áreas de fuertes pendientes con rápida concentración de la escorrentía (Horton, 1945).
	N° de cauces de orden u	Relación de longitud (R_l)	$R_l = L_u/L_{u-1}$	L _u : longitud de los cursos de un orden dado	R _l : el rango 1,5 - 3 es en el que ocurren los valores medios de esta relación. Valores altos revelan una concentración paulatina de caudales mientras que bajos, mayor energía concentrada bruscamente a lo largo del colector principal (Horton, 1945).
	N° total de cauces	Relación de superficie (R_a)	$R_a = A_u/A_{u-1}$	A _u : área de los cursos de un orden dado	R _a : valores elevados indican que el orden jerárquico mayor presenta un tamaño muy superior respecto del orden jerárquico menor y por lo tanto una concentración paulatina de las aguas (Schumm, 1956).
	Longitud de cauces de orden u	Densidad de drenaje (D_d)	$D_d = L_t/A$	L _t : longitud total de cursos A: Área	D _d : Un área con alta D _d posee mayor superficie ocupada por canales de drenaje, por lo que mayor será la superficie para conducir con mayor velocidad el caudal generado por la escorrentía (Horton, 1932).
	Longitud total de cursos	Frecuencia de drenaje (F_d)	$F_d = N_1/A$	N ₁ : número de cursos de orden	F _d : indica la intensidad de los procesos iniciales de arroyada, una mayor F _d indica una rápida organización y concentración del escurrimiento (Strahler, 1964).
		Coeficiente de torrencialidad (C_t)	$C_t = D_d \cdot (N_1/A)$	A: área D _d : Densidad de drenaje	C _t : mide el grado de torrencialidad de la cuenca, a mayor n° de tramos de curso de primer orden y menor superficie, la torrencialidad será mayor (Senciales González, 1999).

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Parámetros e índices relacionados al tamaño y la forma

La cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande (CACMG) tiene una superficie de 36 km² y alturas que varían desde los 1.015 msnm a los 300 msnm y pendientes que alcanzan los 72 ° (Ortuño Cano & Gentili, 2022). En ella se delimitaron un total de cuatro subcuencas a las cuales se las denominó: Norte (*N*), Noroeste (*NO*), Centro (*C*) y Sureste (*SE*) (Figura 2a, 2b). En la tabla de la Figura 2c

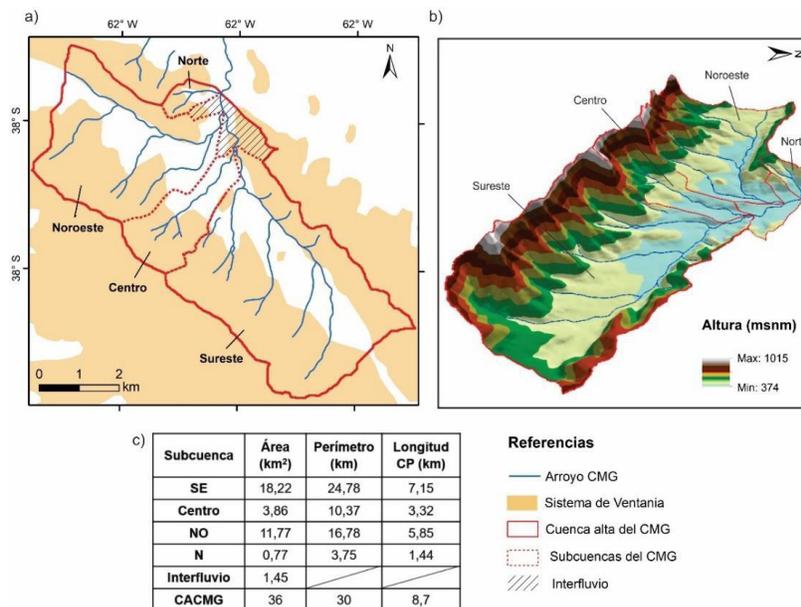
se detallan los parámetros de las subcuencas de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande.

El área de una cuenca es un parámetro importante debido a que permite establecer una primera clasificación entre diversas cuencas según el orden de tamaño que presenten (Chow et al., 1994). Al mismo tiempo, es útil, ya que ante la existencia de iguales condiciones de alimentación por precipitaciones su tamaño tendrá incidencia en el volumen de agua recibida y en la potencialidad como agente desde los procesos erosivos hasta los procesos incluidos en el ciclo hidrológico que pueden o no derivar en inundación (Jardí, 1985; Senciales-González, 1999). Chow et al. (1994) clasificaron las dimensiones de cuencas entre pequeñas, con áreas menores a 250 km² y grandes, con áreas mayores a los 2.500 km². Campos-Aranda (1998) amplía esta clasificación generando nuevos rangos y clasifica las cuencas pequeñas, entre 25 y 250 km², y muy pequeñas aquellas menores a 25 km². Siguiendo esta última clasificación, la CACMG corresponde a una cuenca pequeña y todas las subcuencas analizadas corresponden a la clasificación de cuencas muy pequeñas en relación al mismo autor (< 25 km²). El perímetro es un parámetro que se encuentra estrechamente relacionado con el área ya que aumenta o disminuye en relación directa con aquella y resulta importante para el cálculo de otras variables morfométricas, como se demuestra en la Tabla 1 (Jardí, 1985; Senciales-González, 1999).

La forma de las subcuencas se analizó a partir de la Razón de elongación (Re) y del Coeficiente de compacidad (Kc) (Tabla 2). El resultado del cálculo de ambos índices es de gran utilidad debido a su relación directa con los efectos hidrológicos de la cuenca.

En el caso de la Re, “cuanto más se acerque el valor a 1, más se aproxima la forma de la cuenca a un círculo, por lo que, cuanto mayor sea el valor hallado en esta relación, menos elongada será la cuenca” (Senciales-González, 1999, p. 88). Las cuencas circulares presentan menor retardo y una mayor peligrosidad de crecidas súbitas, según Sala & Gay (1981). Por su parte, las cuencas elongadas presentan un retardo de la concentración de la escorrentía a causa de la longitud del cauce principal, sin embargo, una vez concentradas las aguas, pueden generar crecidas y en ocasiones, derivadas de ellas, inundaciones a lo largo de la cuenca (Senciales-González, 1999). Esper & Perucca (2014) manifiestan que se deben considerar también factores como la extensión espacial de la tormenta y la duración e intensidad de la misma. Pareta & Pareta (2011) definen los valores de este índice en cinco categorías: circular (> 0,9), ovalada (de 0,8 a 0,9), menos alargada (de 0,7 a 0,8), alargada (0,5 a 0,7) y muy alargada (< 0,5). La cuenca del arroyo Cura Malal Grande, desde la naciente hasta la desembocadura, presenta un valor de Re de 0,26 por lo que presenta condiciones de cuencas elongadas (Ortuño Cano & Gentili, 2022) de

Figura 2. Delimitación, denominación (a), vista 3D (b) y parámetros morfométricos (c) para las subcuencas de la cuenca alta CMG



Fuente: elaboración propia.

categoría muy alargada. Sin embargo, todas las subcuencas poseen valores correspondientes a la categoría alargada con valores de Re próximos a 0,7 (Tabla 2).

El Coeficiente de compacidad (Kc) brinda información de las fuerzas y ondas de crecidas. Del valor que tome este coeficiente dependerá la forma de la cuenca siguiendo tres clases: Clase I (casi redonda a oval-redonda) cuando $Kc = 1,00$ a $1,25$; Clase II (oval redonda a oval oblonga) cuando $Kc = 1,26$ a $1,5$; y Clase III (oval-oblonga a rectangular-oblonga) cuando Kc se encuentra entre $1,5$ a más de 2 . Los resultados obtenidos para las subcuencas analizadas (Tabla 2) demuestran que la subcuenca SE presenta el valor más alto y corresponde a la forma oval-oblonga a rectangular-oblonga (Clase III) mientras que las subcuencas C y NO corresponden a formas oval redonda a oval oblonga (Clase II), y la N a la casi redonda a oval-redonda con el valor más bajo.

Los resultados de estos índices para la cuenca alta (que incluye el conjunto de subcuencas SE , NO , N y C y el interfluvio) corresponde según Re a la categoría menos alargada con un valor de $0,78$ y a la categoría de forma oval redonda a oval oblonga (Clase II) siguiendo el Ke de $1,4$. Por lo tanto, esto manifiesta una tendencia de la cuenca alta a una geometría más cercana a una forma oval que a una forma alargada.

Por otra parte, la forma de la cuenca, indica cómo se regula el escurrimiento, su concentración y la tendencia de la cuenca en relación a las crecidas (Díez Herrero et al., 2008). Por lo tanto, se vincula con el Tiempo de concentración (Tc) de una cuenca que se refiere al intervalo temporal que requiere el flujo superficial para aportar al caudal de salida, desde el punto más distante hasta la desembocadura de la cuenca y este periodo está condicionado por la forma de la cuenca (Chow et al., 1994). El Tc en la cuenca alta del CMG en su conjunto es de 58 minutos. Las subcuencas SE y NO son las que presentan mayores tiempos de concentración (en el orden de los '47 y '37 respectivamente) y las subcuencas C y N son las que presentan los menores Tc ('20 y '11 respectivamente). Su análisis contribuye a la evaluación de la influencia de las precipitaciones torrenciales en el escurrimiento superficial y sobre la escorrentía (Camino et al., 2018).

Parámetros e índices relacionados a la hipsometría y las pendientes

El análisis de los aspectos geométricos del relieve que presenta una cuenca (entre los que se incluyen la hipsometría y la pendiente) contribuye al conocimiento de la dinámica

Tabla 2

Razón de elongación (Re) y Coeficiente de compacidad (Kc) para las subcuencas y cuenca alta del arroyo CMG

Subcuencas	SE	C	NO	N	$CACMG$
Re	0,67	0,67	0,66	0,69	0,78
Kc	1,64	1,49	1,38	1,21	1,41

Fuente: elaboración propia.

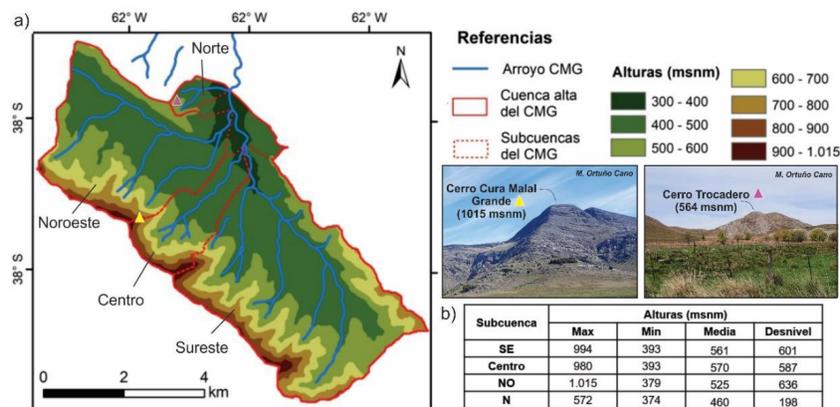
hidrológica y de los procesos fluviales dominantes. Por ello, es un factor de importancia ya que incide y condiciona el escurrimiento fluvial (Bruniard, 1992). Su estudio, entre otras finalidades, resulta de utilidad para comprender su influencia en la génesis y características de las crecidas (Méndez-Gutiérrez et al., 2021; Sreedevi et al., 2009). Los aspectos del relieve analizados a continuación tienen influencia directa sobre el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento, las características del escurrimiento o retención superficial, la infiltración, los tiempos de concentración y los procesos y formas de modelado.

En relación con la hipsometría, las cotas máxima y mínima dan una idea de las diferencias altimétricas en las subcuencas y con ellas el desnivel existente en cada una. La máxima altura de la cuenca corresponde al cerro Cura Malal Grande con 1.015 msnm ubicado en la subcuenca NO (Figuras 3a, 3b). Esta subcuenca es la que presenta el desnivel máximo (636 m) seguida de la subcuenca SE (601 msnm). La subcuenca N presenta tanto para la altura máxima como mínima los valores más bajos con respecto a las otras subcuencas, con un desnivel de 198 m y presentando sobre la divisoria de aguas el cerro Trocadero de 564 msnm (Figuras 3a, 3b).

El estudio de frecuencia altimétrica se utiliza para describir las frecuencias de ciertos niveles en rangos altitudinales sucesivos (Figura 4). Se destaca en las cuatro subcuencas la mayor frecuencia de áreas correspondientes al rango $400-450$ y $450-500$ msnm. La subcuenca SE es la que presenta mayor frecuencia en todos los rangos de altura excepto en el rango superior ($1.000 - 1.015$ msnm) que corresponde únicamente a la subcuenca NO . Las subcuencas C y NO presentan superficies correspondientes a todos los rangos, aunque la subcuenca C implica considerablemente menor proporción. La subcuenca N destaca por no presentar áreas con alturas mayores a 600 msnm (Figura 4).

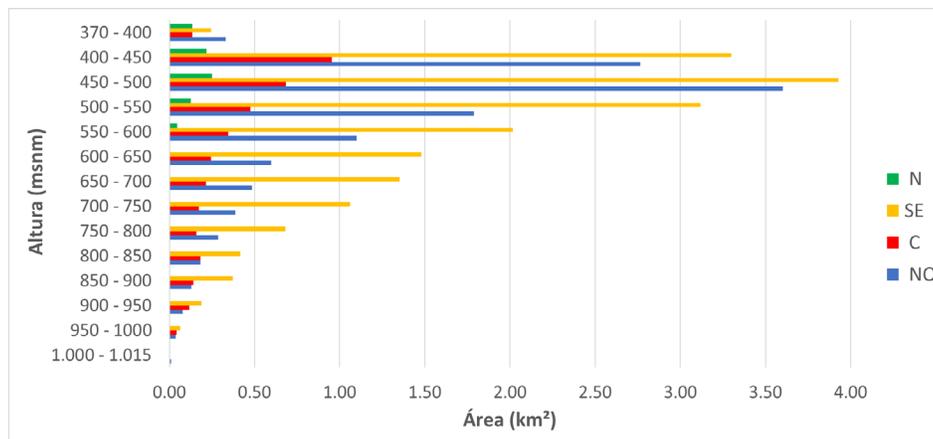
En lo que respecta a la relación entre hipsometría y procesos-formas de la superficie, Pereyra & Ferrer (1998) y Pereyra et al. (2001) identifican en la cuenca alta del arroyo CMG principalmente tres unidades geomórficas

Figura 3. Hipsometría (a) y valores de alturas máxima, mínima, media y desnivel para las subcuencas de la cuenca alta del CMG (b)



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Diagrama de frecuencias altimétricas de las subcuencas de la cuenca alta del arroyo CMG



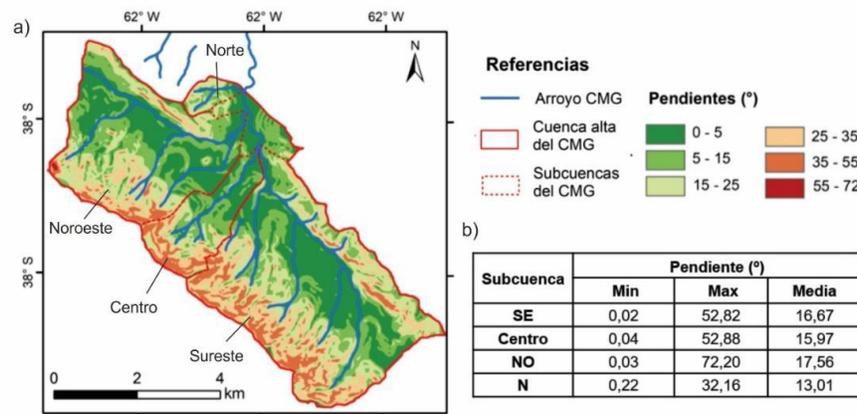
Fuente: elaboración propia.

(U.G.): U.G. Ambiente serrano, U.G. Valle Interserrano y U.G. Planicies aluviales y terrazas fluviales. El ambiente serrano se desarrolla principalmente entre los 500 y 1015 msnm que ocupa 18 km² correspondientes al 50 % del área de la cuenca alta. En este ambiente se identifican profundos valles con laderas escarpadas y fuertes inclinaciones, pendientes abruptas que presentan saltos y escarpas (originados por el comportamiento diferencial a la erosión y meteorización de las rocas) y al pie de las mismas el talud del frente serrano integrado por pendientes cóncava constituida por material coluvial. El valle interserrano, que se encuentra aproximadamente entre los 400 y 500 msnm, se desarrolla en una superficie de 16 km² (46 % del área) se caracteriza por un relieve quebrado y una heterogénea morfología resultante del accionar de la remoción en masa, la acción eólica y el escurrimiento

superficial que es el proceso dominante con numerosas cárcavas y diversos cauces. Por último, las planicies aluviales y terrazas fluviales, ubicadas en torno a los 370 - 400 msnm, representan 2 km² correspondientes al 4 % del área de la cuenca, presentan como resultado del escurrimiento superficial encauzado, al menos un nivel de terraza y planicies aluviales con rodados y alternancia de capas fluviales de diversas granulometrías, que se traducen en suelos de escaso grado de desarrollo.

La pendiente constituye un parámetro de importancia ya que tiene una influencia directa sobre el drenaje y el diseño del mismo, la velocidad y la escorrentía, y consecuentemente en el potencial erosivo y el modelado resultante (Senciales-González, 1999). Dicho parámetro se clasificó siguiendo a Pedraza-Gilsanz (1996) (Figura 5a)

Figura 5. Pendientes para cada subcuenca de la cuenca alta CMG



Fuente: elaboración propia.

y se encuentra detallado en la Figura 5b. Como se puede observar la subcuenca *NO* es la que presenta máximas pendientes (72°) y presenta la media más alta ($17,5^\circ$) y la *N* representa los valores más bajos de máxima y media pero no así de mínima. La *SE* y la *C* presentan similares situaciones en cuanto a máximas, mínimas y medias. Siguiendo a Pedraza-Gilsanz (1996), la subcuenca *N* corresponde a pendientes muy inclinadas ($5^\circ - 15^\circ$) y las restantes subcuencas a la categoría superior débilmente escarpado (15° a 25°). Estos resultados son comparables y significativamente mayores con trabajos realizados en la región para las cuencas Nacimiento oeste, este y cerro 832, cercanas al área de estudio, con pendiente media de $11,83^\circ$, $8,85^\circ$ y $10,76^\circ$ respectivamente (Gentili, 2012; Moretto et al., 2019). Así como también con la cuenca San Bernardo ($8,7^\circ$) junto con la del Oro ($6,3^\circ$), la de El Negro ($3,9^\circ$) o la de El Zorro ($2,1^\circ$) que corresponden a la vertiente opuesta del Sistema de Ventania (Gil et al., 2019).

La importancia de la medición del relieve (hipsometría y pendientes) se debe a que con una mayor altitud del relieve y pendientes pronunciadas el tiempo de concentración de la escorrentía decrece y se incrementan los picos de crecida. Por este motivo se analizó la Razón del Relieve (*Rr*) que se define como la relación entre el desnivel de la cuenca y la longitud máxima de la misma (Schumm, 1956) (Tabla 3). Este índice hace posible conocer la existencia de áreas locales con gran velocidad de caudales y una alta capacidad erosiva de la cuenca cuando los valores son altos (Senciales-González, 1999).

Al analizar los datos obtenidos se observa que las subcuencas *C*, *N* y *NO* son las que poseen los mayores valores. La subcuenca *SE* es la que presenta los valores más bajos

Tabla 3

Índices relacionados al relieve aplicados a las subcuencas y cuenca alta del arroyo CMG

Subcuencas	Razón de Relieve (<i>Rr</i>)				
	SE	C	NO	N	CACMG
<i>Rr</i>	0,08	0,18	0,11	0,14	0,07

Fuente: elaboración propia.

junto a la cuenca alta en su conjunto. Estos resultados combinados con las pendientes muy inclinadas –débilmente escarpadas– y los mayores desniveles de las subcuencas ante eventos de abundantes precipitaciones influyen en una respuesta hidrológica rápida de las subcuencas *C* y *NO*. A su vez, esto se correlaciona con los tiempos de concentración obtenidos para ambas subcuencas principalmente en la subcuenca *C* donde el tiempo es menor. Los resultados de *Re* obtenidos son coincidentes con los valores calculados para otras subcuencas de la vertiente norte del Sistema de Ventania como Nacimiento oeste ($0,15$), cerro 832 ($0,11$) y Nacimiento este ($0,10$) pertenecientes al arroyo Sauce Corto estudiadas por Gentili (2012) y también de la vertiente sur del sistema, como es el caso de la subcuenca Nacimiento ($0,11$) del arroyo Sauce Grande analizada por Gil (2010).

Red hidrográfica e índices vinculados

La red de drenaje de una cuenca se define como el “la trama de canales interconectados que drena un territorio” (Elliott-Munro, 2010, p. 21) y la importancia de su estudio radica en “sus efectos en la formación y rapidez de drenado de los escurrimientos normales o extraordinarios...” (Campos-

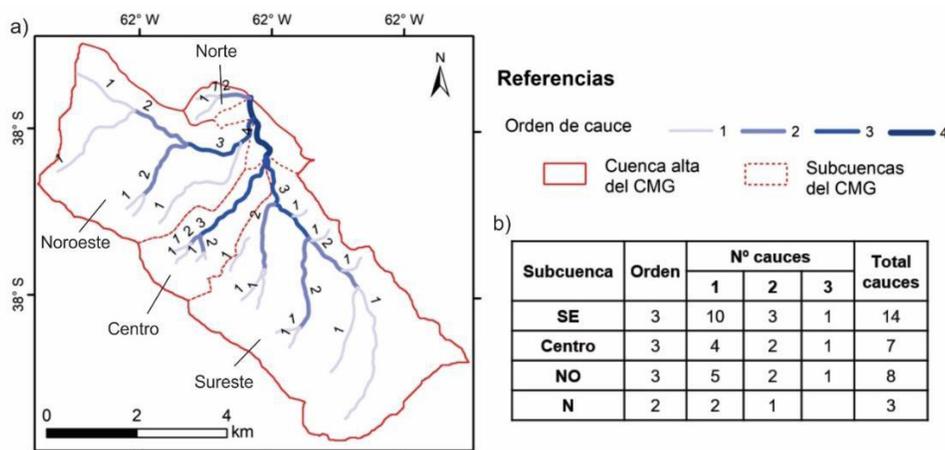
Aranda, 1998, p. 67). Así, la disposición de la red de drenaje condiciona el comportamiento de las crecidas e inundaciones (Klohn, 1970). La incorporación y velocidad de aporte de las precipitaciones a la red de drenaje se encuentra condicionada, entre otros factores, por la forma de esta (Díez Herrero, 2001). En la respuesta hidrológica de la cuenca Klohn (1970) indica que la longitud y desarrollo del cauce principal del río o arroyo de una cuenca es un parámetro importante a considerar. Según Senciales-González (1999) y Campos-Aranda (1998) los ríos que presentan grandes longitudes dan lugar a concentraciones paulatinas de la escorrentía y por lo tanto la energía de la crecida se disipa rápido; por el contrario, en ríos de longitudes menores los efectos de eventos de precipitaciones torrenciales son inmediatos. Las subcuencas *SE* y *NO* son las que poseen las longitudes de cauces más extensas (Figura 2b).

La jerarquización de la red de drenaje es requerida para el análisis morfométrico. Esto resulta elemental dado que el orden que presente la corriente principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca (Strahler, 1964). La Figura 6a presenta la red hidrográfica de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande jerarquizada. En Figura 6b se detallan las subcuencas, su orden y el número de cauces (n° cauces) por orden y el total de cada uno. Las subcuencas *SE*, *NO* y *C* presentan red de drenaje de orden 3 antes de la confluencia con el cauce principal (de orden 4) en el sector del abra. En estas subcuencas se destaca el número de tramos de orden 1 y esto es importante ya que significa que durante un evento de fuertes precipitaciones la respuesta será más rápida y,

en consecuencia, el volumen de agua aumentará en el cauce principal y el agua en exceso se evacuará en menor tiempo (Strahler, 1964; Tomé Hernández, 2022). Esto es concordante con los T_c identificados, principalmente para *NO* y *C* y los resultados obtenidos de R_r para las mismas subcuencas (Tabla 3).

A partir de la jerarquización de los órdenes de la cuenca es posible analizar diferentes índices útiles para comprender la respuesta hídrica superficial de la cuenca. La Relación de bifurcación (R_b) se refiere a la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato superior (Strahler, 1974). Es uno de los índices que más se utilizan porque determina la mayor o menor rapidez de las ondas de crecida, lo que define entre otros parámetros, el grado de peligrosidad de la cuenca. Según Senciales-González (1999) los valores de R_b próximos a 2 permiten inferir cuencas o áreas de escaso relieve, los valores entre 3 y 5 corresponden a valores típicos para los sistemas fluviales en cuencas donde la estructura geológica no distorsiona el patrón de drenaje natural y aquellos valores superiores a 5 e incluso a 10 indican una fuerte dependencia estructural (Strahler, 1964). En el caso de las subcuencas analizadas la mayor R_b media corresponde a la subcuenca del *SE* (3,17) que se encuentra en el rango característico de los sistemas fluviales (Tabla 4). Para la cuenca alta en su conjunto el valor de R_b promedio es bajo (2,7). Según Senciales-González, los valores bajos en este índice suelen estar asociados a “concentración brusca de la escorrentía; concentración que, en principio, muestra un marcado retardo y que alcanza unos picos de crecida importantes” (1999, p. 67). Esto guarda estrecha relación con la forma de la cuenca alta.

Figura 6. Jerarquización de la red de drenaje según el método de Strahler (1964) (a), orden máximo de subcuenca y número de cauces por cada orden (b)



Fuente: elaboración propia.

De forma similar a la relación de bifurcación, se define la Relación de longitud (Rl) como “la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior” (Senciales-González, 1999, p. 74). Horton (1945) formuló la ley de la longitud de los cauces “la longitud media acumulada de segmentos de cauce de órdenes sucesivos tiende a formar una progresión geométrica cuyo primer término es la longitud media de los segmentos de primer orden y tiene por razón una relación de longitud constante” (1945, p. 286). Según Senciales-González (1999), los cauces situados en áreas de fuertes pendientes suelen presentar longitudes mayores. Los valores medios oscilan entre 1,5 en las cuencas en las que la longitud de los cauces se incrementa levemente y 3 para las cuencas en las que los órdenes superiores muestran mayores longitudes. Sin embargo, el mismo autor manifiesta la posibilidad de encontrar valores superiores e inferiores a estos, dando a dichas cuencas especial interés morfológico. Valores bajos de Rl, como en el caso de las subcuencas analizadas, muestran mayor energía concentrada bruscamente, mientras que valores altos revelan una concentración paulatina de la escorrentía a lo largo del cauce principal. Analizando los valores medios de los Rl obtenidos se observa que tres de las subcuencas poseen los menores valores ($Rl < 3$) (Tabla 4) y se corresponden con cuencas en las que en la longitud de los cauces se produce un incremento leve. La subcuenca *N* presenta el mayor valor y esto concuerda con aquellas cuencas en las cuales sus órdenes superiores poseen mayores longitudes (Senciales-González, 1999).

Las mismas propiedades que se corresponden con la longitud se presentan con el área ocupada por los tramos de cada orden de cauce, es decir, la superficie promedio acumulada de segmentos de órdenes sucesivos tiende a formar una progresión geométrica según una relación de incremento de área constante (Schumm, 1956; Strahler, 1974). La Relación de superficie (Ra) presenta valores puntuales altos en las subcuencas *C* y *SE* mientras que en las restantes los valores son más bajos coincidentes con los resultados inferidos para Rl (Tabla 4). De esta manera, se podría inferir para las subcuencas *SE*, *C* y *NO* una mayor energía concentrada.

La cuenca alta del CMG en su conjunto, presenta resultados de Rb similares a los obtenidos por Gentili (2012) y Moretto et al. (2019) para otras subcuencas de la vertiente norte como Nacimiento oeste y Nacimiento este (2,7 y 2,9 respectivamente). Sin embargo, los valores de Rl son más bajos para las mismas subcuencas (0,57 y 0,67 respectivamente) según Moretto et al. (2019). Por el contrario, sobre la vertiente sur, los resultados

Tabla 4

Relación de bifurcación (Rb), relación de longitud (Rl) y relación de superficie (Ra) entre los distintos órdenes de las subcuencas y cuenca alta del arroyo CMG

Subcuencas	SE	C	NO	N	CACMG
Rb media	3,17	2	2,25	2	2,7
Ri media	1,49	4,15	1,16	1,15	1,3
Ra media	4,01	5,69	3,00	3,15	3,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5

Densidad de drenaje para las subcuencas y cuenca alta del arroyo CMG

Densidad de drenaje (Dd)					
Subcuencas	SE	C	NO	N	CACMG
Dd	0,99	1,19	1,10	2,54	1,09

Fuente: elaboración propia.

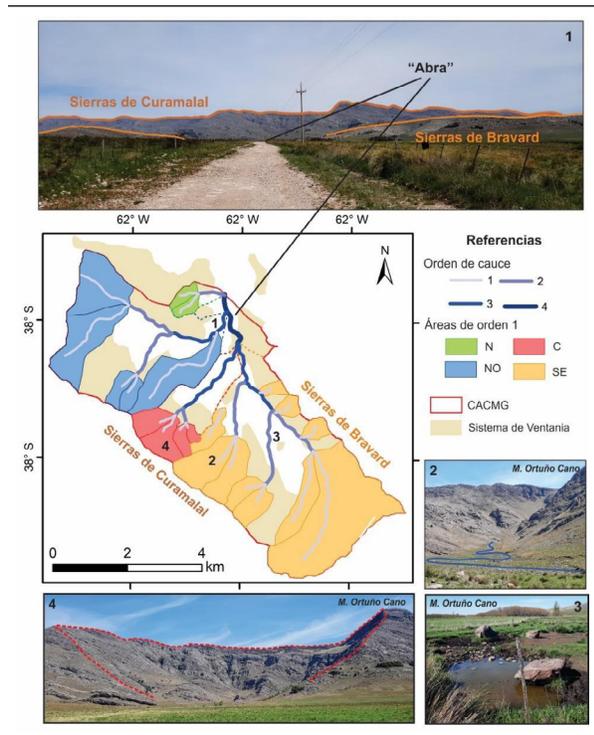
de Rb observados por Gil et al. (2019) en el arroyo San Bernardo (3,65) en la misma escala de trabajo son ligeramente mayores.

Por otra parte, la Densidad de drenaje (Dd) es otro de los índices de mayor relevancia en una cuenca ya que la misma controla la eficiencia de drenaje. Cuanto mayor es el valor de este índice, más rápida es la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación por lo que el escurrimiento se evacuará en menos tiempo (Senciales-González, 1999). Al mismo tiempo, este índice señala el estado erosivo de la cuenca (González de Matauco, 2004; Senciales-González, 1999). Según Strahler (1974) la litología, la facilidad de infiltración del agua de lluvia bajo la superficie del terreno y la presencia de cobertura vegetal son los factores que controlan este índice.

La clasificación de los valores de densidad de drenaje varía entre diferentes autores (Horton, 1932; Morisawa, 1985; Senciales-González, 1999; Strahler, 1974).

Los valores para las subcuencas analizadas están comprendidos en el intervalo correspondiente a bajas densidades de drenaje o texturas gruesas ($< 10 \text{ km}^2/\text{km}^2$ siguiendo a Strahler, 1974) (Tabla 5). Este mismo autor, sostiene que las bajas densidades de drenaje son características de las areniscas y cuarcitas, litología que se encuentra en las subcuencas analizadas (Harrington, 1947). Las subcuencas *SE*, *C* y *NO* presentan valores similares y una diferencia con la subcuenca *N* que puede deberse a su menor desarrollo areal. Los bajos valores que presentan las tres primeras podrían estar relacionados con el escurrimiento de las cuencas sobre terrenos permeables y con alta

Figura 7. Representación de las áreas de orden 1 en relación al conjunto de la cuenca alta del CMG



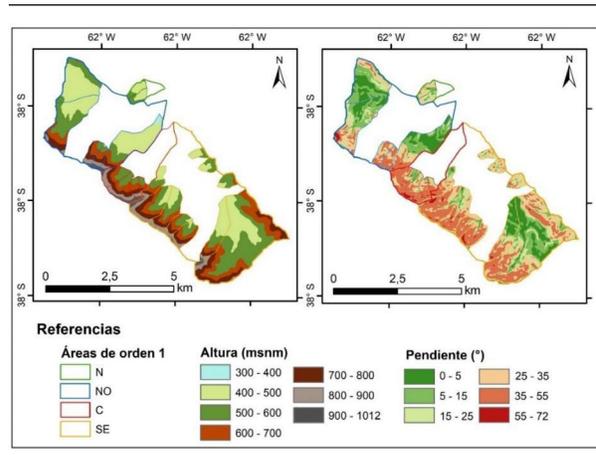
Fuente: elaboración propia sobre la base de cartas geológicas escala 1:200.000 Sierras de Curamalal y de la Ventana (Harrington, 1947).

infiltración del sector interserrano, así como también del sector serrano para el cual Luque et al. (1979) manifiestan la presencia de porosidad secundaria debido al grado de fracturación de las rocas duras que forman el sustrato rocoso de la cuenca alta en general. Situación similar fue observada por Gil et al. (2009) y Gil et al. (2016) en las subcuencas de las cuencas altas del río Sauce Grande y arroyo Sauce Corto del Sistema de Ventania que presentan similar litología, fracturamiento y porosidad.

En la cuenca alta es necesario el análisis de los tramos de cauce de orden 1 dada su contribución en la generación de flujos torrenciales y de crecidas repentinas. Se destaca el área que representan los mismos ya que constituyen el 57% de la superficie total de la cuenca alta (20,5 km²) (Figura 7).

De las subcuencas analizadas se destacan las subcuencas del SE y NO con un total de 10 y 5 tramos de cauces de orden 1 respectivamente. En general, los tramos de orden 1 nacen en las sierras de Curamalal desde alturas elevadas y pendientes pronunciadas, mientras que en la subcuenca N y algunos de los de la SE nacen sobre el sector de Bravard.

Figura 8. Hipsometría y pendientes de las cuencas correspondientes a los tramos de orden 1 de las diferentes subcuencas



Fuente: elaboración propia.

En este último caso los tramos presentan longitudes, pendientes y alturas menores (Figura 8).

En promedio los cauces de orden 1 de las subcuencas poseen longitudes de 1 km. La subcuenca NO es la que presenta los cauces más extensos (1,57 km promedio) seguida de la SE (1,04 km) y la subcuenca C es la que posee los de menor (0,35 km). Sin embargo, las longitudes no se condicen con las superficies que abarcan los mismos tramos (áreas de captación) tramos ya que las mismas varían entre los 0,14 km² en la subcuenca C y otras de 6 km² en la subcuenca SE. En promedio, la subcuenca NO es la que presenta las mayores superficies en los tramos de cursos de orden 1, seguida de la subcuenca SE.

En relación a los promedios de alturas máximas y mínimas se observa que para el caso de las máximas es de 840 msnm y las mínimas de 456 msnm. La subcuenca N registra el menor valor en cuanto a máxima y mínima altura (571 y 419 msnm respectivamente). La subcuenca C es en promedio la que posee alturas promedio ligeramente más altas que las subcuencas restantes en el área correspondiente a los tramos de primer orden.

Las pendientes de los tramos de cauce de orden 1 presentan gran variabilidad. La pendiente media de todas las áreas de orden 1 es de 28°. La subcuenca NO presenta la máxima pendiente media (57,5°). Sin embargo, la subcuenca SE presenta en 7 de sus subcuencas de orden 1 (de un total de 10) pendientes entre los 55° y 62°.

Por último, y en relación a los tramos de orden 1 existen dos índices útiles para conocer su comportamiento y

su intensidad fluvial: la Frecuencia de drenaje (Fd) y el Coeficiente de torrencialidad (Ct). La Frecuencia de drenaje (Fd) es la relación entre el número de tramos de cauces de primer orden y la superficie de la cuenca, expresado en número de cauces por kilómetro cuadrado (Strahler, 1964). Siguiendo a Senciales-González (1999), es importante debido a que indica la intensidad del proceso de escurrimiento permite establecer relaciones con múltiples factores del medio como las precipitaciones y la vegetación. En la Tabla 6 se pueden observar los resultados obtenidos donde la cuenca *N* y *C* presentan los valores mayores. Menores tiempos de concentración se verifican en estas dos cuencas. Relacionado con este último se encuentra el Coeficiente de torrencialidad (Ct) que multiplica la Dd y el Fd y permite obtener una aproximación al estudio de máximas crecidas ya que se encuentra vinculado con la capacidad de descarga que tendrá la cuenca (Senciales-González, 1999). Entendiendo que a mayor frecuencia de tramos de orden 1 y menor superficie de la cuenca la torrencialidad de la misma es mayor, se puede afirmar que existe correlación entre la Dd y este coeficiente ya que la torrencialidad de la cuenca será mayor cuanto mayor sea la Dd (Tablas 5, 6). De esta manera, se pudo observar que si bien las subcuencas *SE* y *NO* son las que presentan el mayor número de tramos de cauce de orden 1 la torrencialidad de estas subcuencas es menor y se debe a que sus áreas tienen mayor desarrollo. Las subcuencas *C* y *N*, aunque poseen el menor número de tramos de orden 1, presentaron mayores valores de Ct y esto es coincidente con los menores Tc que presentan y los mayores valores de Rr ya mencionados. Resultados similares se observaron para la vertiente sur del sureste bonaerense donde las cuencas Lobería y Corrientes presentan altos Ct y bajos números de tramos de orden 1 así como menores superficies de áreas comparadas con otras cuencas estudiadas en este mismo sector (Camino et al., 2018).

La cuenca alta en su conjunto presenta valores similares a los obtenidos por Gentili (2012) para la cuenca San Antonio de similar área (32 km²) con Dd de 0,96 y Fd de 0,5. Por su parte, el Coeficiente de torrencialidad es ligeramente superior a la subcuenca El Toro con un valor de 0,47, un área (57 km²) con Dd de 1,1 y Fd de 0,42 analizada por Gil (2010) a la misma escala.

Conclusiones

El estudio morfométrico de una cuenca hidrográfica es de gran importancia para comprender su comportamiento hidrológico y morfodinámico. Del análisis conjunto de las características hipsométricas, de pendientes y morfométricas

Tabla 6

Frecuencia de drenaje de cauces de primer orden (Fd) y Coeficiente de torrencialidad (Ct) para las subcuencas y cuenca alta del arroyo CMG

Subcuencas	SE	C	NO	N	CACMG
Fd	0,55	1,04	0,42	2,60	0,58
Ct	0,54	1,23	0,47	6,59	0,63

Fuente: elaboración propia.

junto a la red de drenaje de las subcuencas de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande se puede inferir que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por la litología presente en la cuenca, los desniveles y los elevados gradientes de las pendientes junto a, principalmente, la existencia de cuencas de orden 1 que representan el 57% de la superficie total de la cuenca alta. Las cuencas de orden 1 se originan y desarrollan mayormente en el ambiente serrano caracterizado por profundos valles (con laderas escarpadas y pendientes abruptas), escarpas y taludes (de pendientes cóncavas y constituidos por material coluvial).

A partir de las características descritas de los tramos de orden 1 se pudo inferir la torrencialidad que poseen las subcuencas y la cuenca alta en su conjunto ante la ocurrencia de eventos de precipitación intensa. Cuando se generan estas precipitaciones, la escorrentía discurre por estos tramos y rápidamente (debido a los desniveles y elevados gradientes de las pendientes) alcanzan los tramos de cauce de orden superior contribuyendo a la generación de crecidas. El análisis de los índices asociados a la forma (geometría más cercana a una forma oval que a una forma alargada) junto a los vinculados a la red de drenaje, coinciden con lo descrito anteriormente.

En el análisis referido a cada una de las subcuencas, los resultados obtenidos para los índices de Tc, Rr, Rl y Ra permiten inferir que para las subcuencas *C* y *NO* es posible esperar una mayor energía concentrada y una rápida respuesta ante eventos de precipitación intensa. El Ct resultó mayor en la subcuenca *N*, sin embargo, se entiende que esto se debe a que esta subcuenca presenta un desarrollo areal sustancialmente menor y el menor número de cauces de orden 1.

Para la cuenca alta en su conjunto, se espera como respuesta hidrológica ante la ocurrencia de eventos de precipitación intensa, tiempos de concentración cortos y por lo tanto una rápida afluencia hacia el curso principal del arroyo. Esta respuesta hidrológica puede generar inundaciones que afectan extensas áreas rurales aguas abajo del punto

de cierre de la cuenca alta y a la localidad de Cura Malal emplazada en el sector medio de la misma.

Los resultados obtenidos constituyen un aporte al conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca alta y de la susceptibilidad que presenta para la generación de crecidas. Asimismo, constituye una línea de base para la continuidad de estudios morfométricos y de amenaza frente a inundaciones en el área.

Agradecimientos

A la Bolsa de Cereales y Productos de Bahía Blanca por el aporte de los datos (Estación Cura Malal) de su Red de Estaciones Meteorológicas. El presente trabajo se desarrolló en el marco del PGI “Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas ambientales a diversas escalas témporo-espaciales” (24/G092) (SGCyT-UNS).

Referencias bibliográficas

- Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.003>
- Aumassanne, C. M., Gaspari, F. J., Bege, M. E., Sartor, P. D., Oricchio, P., y Di Bella, C. M. (2018). Morfometría de la cuenca alta del Río Colorado, Argentina. *Boletín Geográfico*, 1(40), 13-29. <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/2056>
- Brieva, C. (2018). Caracterización de cuencas. Proyecto Específico 1133022 *Caracterización y análisis multidisciplinario de la información hidrológicas en cuencas*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22410.11203>
- Bruniard, E. (1992). *Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. CEYNE.
- Busnelli, J., & Horta, L. (2014). Morfometría de cuencas, montañas y metamorfosis fluvial, Tucumán. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 1, 11-20.
- Caicedo Toro, M. D. C., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., & Intriago Zambrano, P. E. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 4(1), 6.
- Camino, M., Bó, M. J., Cionchi, J., Del Río, J., Lopez de Armentia, A., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Campo, A. M. (2015). Geografía física: ¿Tradicional o aplicada? En A. M. Campo (Dir.), V. Gil, J. O. Gentili, P. Zapperi, A. Volonté, M. B. Ramos, B. Aldalur & M. P. Torrero, *Geografía Física Aplicada*. Tomo I. Hidrología Regional y Local (pp. 11-25). Serie Extensión. Colección Estudios Sociales y Humanidades.
- Campo, A. M., Aldalur, N. B., & Fernández, S. N. (2012). Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 77, 7-17. <https://doi.org/10.14350/rig.31006>
- Campos-Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. En *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Campo de Ferreras, A. M., Diez, P. G., & Capelli de Steffens, A. M. (2004). *El clima del suroeste Bonaerense*. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.
- Capitanelli, R. G. (1998). *Geografía Física y Medio Ambiente* (1° Ed.). Ecogeo.
- Casado, A., & Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>
- Chow, V.T., Maidment, D.R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGrawHill.
- Costa, J. E. (1987). Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 93(3-4), 313-338. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90102-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90102-8)
- Demoulin, A., Zarate, M., & Rabassa, J. (2005). Long-term landscape development: A perspective from the southern Buenos Aires ranges of east central Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(2), 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.12.001>

- Díaz Gómez, R., Gaspari, F. J., & Georgieff, S. M. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 3-19.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L., & Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Elliott Munro, S. (2010). *El río y la forma*. RIL Editores.
- Esper Angillieri, M. Y., & Perucca, L. P. (2014). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 235-245. <https://doi.org/10.18268/bsgm2014v66n2a2>
- Esper Angillieri, M. Y., Perucca, L. P., & Rothlis, L. M. (2016). Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones, caso de estudio: Cuenca del río del Agua, San Juan, Argentina. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 73(4), 513-519. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v73n4/v73n4a05.pdf>
- Fayyad, H., & Al-Akam, I. (2021). Morphometric Characteristics of the Aziana Valley Basin. *Journal of the College of Education for Women*, 32(2). <https://doi.org/10.36231/coedw.v32i2.1499>
- Fuschini Mejía, M.C. (1994). *El agua en las llanuras*. UNESCO/ORCYT.
- Gentili, J. O. (2012). *Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de inundaciones y anegamientos*. Universidad Nacional del Sur.
- Gentili, J. O., & 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. <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383239184008.pdf>
- Gil, V., Gentili, J. O., & Campo, A. M. (2009). Influencia De La Litología En La Variación De Los Parámetros Morfométricos, Sistema De Ventania, Argentina. *Papeles de Geografía*, (49-50), 55. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/92381>
- Gil, V., Gentili, J., Campo, A. M., Jelinski, G., & Crisafulli, M. (2016). Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires. *Tercer Encuentro de Investigaciones En Formación de Recursos Hídricos*.
- Gil, V., Volonte, A., & 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*, 20(4). <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1598>
- González De Matauco, A. I. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicados a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de La A.G.E.*, 38, 311-326. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/495>
- González Uriarte, M., Carballo, O., Aldacour, H., & Calmels, A. (1988). Geomorfología de la Sierra de Bravard y su piedemonte. *Actas de Segundas Jornadas de Geología Bonaerense*, 173-185.
- Guevara Gutiérrez, R. D., Olguín López, J. L., Mancilla Villa, Ó. R., & Barreto García, Ó. A. (2019). Análisis Morfométrico de la Cuenca Hidrográfica del Río Ayuquila, Jalisco-México. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 24, 141-158. <https://doi.org/10.21138/gf.622>
- Gregory, K., & Walling, D. (1973). *Drainage basin. Form and process: a geomorphological approach*. Edward Arnold.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Educacion, Prentice Hall.
- Harrington, H. J. (1947). Explicación de las Hojas Geológicas 33m (Sierra de Curamalal) y 34m (Sierra La Ventana). Provincia de Buenos Aires. *Boletín de La Dirección de Minería y Geología*, 61, 1-43.
- Heras, R., (1983). *Recursos Hidráulicos. Síntesis. Metodología y Normas*. Cooperativa de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Horton, R. (1932). Drainage Basin Characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13, 350-361.

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:edosat\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2)
- Jardí, M. (1985). Forma de cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41-68. <https://raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/45789>
- Kamble, P. B., & Herlekar, M. A. (2022). Morphometric Analysis of Achara River Basin, Maharashtra, India. *AJANTA*, 11, 18-32.
- Keller, E., & Pinter, N. (1996). *Active tectonics: Earthquakes Uplift and Landscape*. New Jersey.
- Klohn, W. (1970). Magnitudes fisiográficas e índices morfométricos relacionados con hidrología. *Publicación Aperiódica*, 12. Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología, Bogotá, Colombia.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D., & Bonorino, G. A. (1979). *Estudio Hidrológico e Hidrogeológico de la Cuenca del Río Sauce Grande. Serie Hidrológica N° 3*, Departamentos de Ciencias Agrarias y Naturales, Universidad Nacional del Sur.
- Méndez-Gutiérrez, A. G., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F., & Pompa-García, M. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>
- Méndez, W., & Marcucci, E. (2006). Análisis morfométrico de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 47(1), 29-55. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730363003>
- Moretto, B., Gentili, J. O., & Campo, A. M. (2019). Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina). *Huellas*, 23(2), 149-167. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas/article/view/3888>
- Morisawa, M. (1985). *Earth Surface Processes and Landforms*. Ed. Longman.
- Navarro, E. L., & Cano, D. M. (2017). Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes, uso de técnicas digitales. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017. Centro de Geología Aplicada.
- Ojeda, A. O., Ibisate, A., Matauco, G. De, García, J. H., Ferrer, C., Pedro, J., Vide, M., Naverac, V. A., Ferrer, D. B., Bea, E. D., García, D. G., Mora, D., & Sánchez, M. (2011). *Indicadores geomorfológicos para el seguimiento de la restauración fluvial*. I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial, León, España.
- Ortuño Cano, M., Gentili, J., Moretto, B., & Campo, A. (2019). Eventos de exceso hídrico en la prensa escrita (Sistema de Ventania, Argentina). *Boletín Geográfico*, 1(41), 53-75. <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/2366>
- Ortuño Cano, M. de los Á., & Gentili, J. O. (2022). Influência de fatores físicos no padrão fluvial e setorização da bacia do cura influence of physical factors on the fluvial pattern and sectorization of the Cura Malal Grande basin (Argentina). *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, 20(3), 241-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.5016/estgeo.v20i3.16753>
- Pareta, K., & Pareta, U. (2011). Quantitative Morphometric Analysis of a Watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) Data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 248-269.
- Pedraza Gilsanz, J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Rueda.
- Pereyra, F., Tchilinguirian, P., Copolecchia, M., Cavallaro, S., Fratolocchi, C., Borello, L., Milanese, J. B., & Suriano, J. M. (2001). Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Carta de Línea de Base Ambiental 3763-IV Coronel Suárez 1:250.000.
- Pereyra, F., & Ferrer, J. (1995). Geomorfología del flanco nororiental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses*, 239-247.
- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de Modelos Digitales del Terreno. *Boletín Del Instituto de Fisiografía y Geología*, 77, 31-38. <https://rehip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/f0c58226-3145-43dc-b4c8-a16621524526/content>

- Ritter, D. F., Kochel, R. C., & Miller, J. R. (2002). *Process Geomorphology*. McGraw Hill.
- Ramírez-Granados, P., & Alfaro-Jiménez, K. (2018). Morfometría de la subcuenca del río Toyogres, Cartago, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 255. <https://doi.org/10.15359/rgac.60-1.9>
- Rocha, R. M., Lucas, A. A. T., Almeida, C.A., Menezes Neto, E. L., & Netto, A. D. O. A. (2014). Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445-458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Romero Díaz, M. A., & Bermúdez López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*, 12, 47-62. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42391>
- Sala, M., & Gay, R. (1981). Algunos datos morfométricos de la cuenca de Isábena. *Notes de Geografía Física*, 4, 41-65.
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67)
- Sellés-Martínez, J. (2001). Geología de la Ventania. *Journal of Iberian Geology*, (27), 43-69. <https://core.ac.uk/reader/38808120>
- Senciales-González, J. (1999). *Redes fluviales. Metodología de análisis*. UMA Editorial, Universidad de Málaga.
- Shagui Miranda, D., Chucay Chacha, M., & Negrete Costales, J. (2021). Morphometric Analysis of the Sub-basin of the Upano Para River Flood Analysis. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 1(2), 1024-1032. <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9528>
- Sreedevi, P. D., Owais, S., Khan, H. H., & Ahmed, S. (2009). Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. *Journal of the Geological Society of India*, 73(4), 543-552. <https://doi.org/10.1007/s12594-009-0038-4>
- Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913>
- Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. En V. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology compendium of water-resources technology* (pp. 39-76). McGraw-Hill Book Co.
- Strahler, A. (1974). *Geografía Física*. Omega S.A.
- Subedi, M., & Tamrakar, N. K. (2020). Fluvial Geomorphology and Basin Development of Karra Khola Basin, Hetauda, Central Nepal. *Journal of Geological Research*, 2(4), 1-13. <https://doi.org/10.30564/jgr.v2i4.2250>
- Tomé Hernández, G. (2022). Caracterización morfométrica de la cuenca del Río Huitzilac, Puebla, México. *Boletín Geográfico*, 44(1), 41-55. <http://portal.amelica.org/amei/journal/344/3443321005/3443321005.pdf>
- Varshney, A., & Shukla, S. (2022). Morphometric Analysis in Varuna River Basin: A Geoinformatics Based. *International Journal for Research in Applied Science y Engineering Technology*, 10(III), 343-350. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40642>
- Veneziani, Y., Rodrigue, C., & da Costa Mantovani, J. (2019). Fluvial geomorphology of the lower Ribeira de Iguape, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(3), 541-562. <https://doi.org/10.20502/RBG.V20I3.1545>
- Vich, A. I., Pasquali, E. L. V., Otta, S. A., Lauro, C., & Bastidas, L. B. (2020). Morphometric analysis of basins located in the piedmont of central Western Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 60(1), 295-312. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i1.9639>
- Von Gosen, W., Buggisch, W., & Dimieri, L. V. (1990). Structural and metamorphic evolution of the Sierras Australes (Buenos Aires Province/Argentina). *Geologische Rundschau*, 79(3), 797-821. <https://doi.org/10.1007/BF01879216>
- Zapperi, P. A., Ramos, M. B., Gil, V., & Campo, A. M. (2007). Caracterización de las precipitaciones estivales en el Suroeste bonaerense. *Contribuciones Científicas GAEA*, 19. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/94838>