



Morfometría de una cuenca serrana no aforada: el caso del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)

Morphometric of a ungauged basins: the case of the Sauce Corto stream (Buenos Aires, Argentina)

Historial del Artículo

Recibido:

5 de julio de 2024

Revisado:

25 de noviembre de 2024

Aceptado:

11 de diciembre de 2024

Belén Moretto^a, Jorge Osvaldo Gentili^b

^aFiliación: Universidad Nacional del Sur (UNS). Correo: belenmoretto22@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4854-8967>

^bFiliación: Universidad Nacional del Sur (UNS) - CONICET. Correo: jogentili@uns.edu.ar

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4787-4667>

Palabras clave

Cuenca alta arroyo Sauce Corto, morfometría fluvial, peligrosidad

RESUMEN

El análisis de los parámetros morfométricos resulta de relevancia para comprender las características físicas de una cuenca de drenaje y sus incidencias en la dinámica hidrográfica, principalmente en países del Sur Global donde los aforos no son sistemáticos y no se cuenta con series de datos históricas de gran extensión. Es una herramienta de gran relevancia en cuencas no aforadas, como la del arroyo Sauce Corto (SC) (Buenos Aires, Argentina), analizada en este estudio. La ocurrencia de eventos extremos de precipitación en la parte alta de esta cuenca provoca afectaciones en las principales localidades del partido de Coronel Suárez y áreas rurales del mismo. El objetivo del trabajo fue caracterizar morfométricamente las subcuencas de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto para la valoración de su potencialidad para generar crecidas. Se caracterizaron las cuencas cuali-cuantitativamente y se utilizaron parámetros relacionados a la forma, el relieve y la red de drenaje. Su cálculo posibilitó identificar aquellas subcuencas con mayor peligrosidad respecto a la generación de crecidas, siendo las subcuencas de la margen occidental (Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Cerro 832) las de mayor potencialidad, vinculada a parámetros asociados al relieve, a la red de drenaje y forma de la cuenca. Su estudio constituye una herramienta para la elaboración e implementación de medidas locales de gestión del riesgo de inundación.

Keywords

Fluvial morphometry, hazard, Sauce Corto's upper basin

ABSTRACT

The analysis of morphometric parameters is relevant to understand the physical characteristics of a drainage basin and their impact in hydrographic dynamics, mainly in countries in the global south where flow measurements are not systematic and there are no long-term historical data series. This tool is particularly relevant for ungauged basins, such as the Sauce Corto stream basin (SC) (Buenos Aires, Argentina), analyzed in this study. The occurrence of extreme precipitation events in the upper part of this basin causes effects in the main towns of the Coronel Suárez district and its rural areas. The aim of this work was to characterize morphometrically the sub-basins of the upper basin of the Sauce Corto stream in order to assess their potential to generate floods. The basins were characterized qualitatively-quantitatively and indexes related to the shape, relief and drainage network were used. Its calculation made it possible to determine those sub-basins with the greatest hazard of flooding, with the basins on the western margin (Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Cerro 832) being those with the greatest potential, linked to parameters associated with the relief, the drainage network and the shape of this basin. Its study constitutes a tool for the development and implementation of local flood risk management.

Introducción

La cuenca hidrográfica entendida como una unidad territorial y compleja para el análisis ambiental abarca factores físico-naturales, sociales, económicos, políticos, institucionales y culturales. Estos componentes interactúan entre sí y forman un complejo sistema que requiere de un tratamiento integral con el fin de una eficiente gestión sostenible de la cuenca (Moreira Braz et al., 2020). En función de las características físicas de la cuenca (parámetros altitudinales, dimensiones, forma y patrón de la red de drenaje) es posible inferir su peligrosidad ante la ocurrencia de eventos de inundación y anegamiento contribuyendo a la gestión del riesgo. En el contexto del cambio climático y en un escenario global marcado por riesgos dinámicos y cambiantes, se observa un incremento de fenómenos hidrometeorológicos extremos (IPCC, 2023; UNDRR, 2022). Entre ellos, las inundaciones y los anegamientos destacan como los eventos hidrometeorológicos que generan mayores impactos. Se espera que la magnitud, frecuencia e intensidad de estos fenómenos se incrementen conforme aumenten las temperaturas globales, exacerbando los desafíos para la gestión sostenible de las cuencas (IPCC, 2022, 2023; UNDRR, 2022).

La morfometría fluvial constituye una herramienta útil para proporcionar una comprensión general de las características físicas de una cuenca de drenaje con respecto a las crecidas. Posibilita comprender la influencia de la estructura geológica, las geoformas y las características hidrológicas de cualquier cuenca (Senciales González, 1999). Estas características fueron estudiadas en diferentes partes del mundo utilizando métodos convencionales por autores como Horton (1932, 1945), quien abordó los primeros modelos cuantitativos para estudiar la dinámica fluvial, y seguido por trabajos teórico-metodológicos de autores de relevancia como Jardí (1985), Romero Díaz & López Bermúdez (1987), Senciales González (1999), Smith (1950), Schumm (1956) y Strahler (1957, 1964). En numerosos artículos a nivel mundial, el análisis morfométrico se trabaja entre otros objetivos para contribuir a la planificación y gestión de los recursos hídricos en cuencas (Abdeta et al., 2020; Çadraku, 2023; Kant et al., 2023; Patil & Bhagwat, 2023; Prakasam, 2021) y en particular para evaluar el potencial de ocurrencia de inundación de las cuencas de drenaje (Alam et al., 2021; Chakraborty, 2023; Das, 2019; Gaurav Singh & Singh, 2024; Gautam et al., 2021; Ismail et al., 2022; Raja Shekar & Mathew, 2024; Singh et al., 2023; Tola & Shetty, 2022). Específicamente en Iberoamérica y en los últimos años, este análisis es utilizado para múltiples propósitos. Entre ellos para evaluar la infiltración y el potencial de recarga de cuencas,

para comprender la morfodinámica fluvial o evaluar la potencialidad de crecidas (Castillo-Cruz & Medrano-Pérez, 2024; Del-Águila & Mejía, 2021; López-Ramos et al., 2022; Luís Reis et al., 2023; Oliveira et al., 2023; Parente et al., 2020; Simonetti et al., 2022).

En Argentina, en los últimos cinco años, el análisis de parámetros a nivel de cuencas hidrográficas fue aplicado en diferentes unidades ambientales del país, con objetivos distintos. En ambientes montañosos, específicamente en la cordillera y precordillera se destacan los trabajos de Esper Angillieri & Fernández (2017) para cuencas de los Andes centrales, Quiroga et al. (2017) para las cuencas de los ríos Moneta y Avilés en Tierra del Fuego, y Vich et al. (2021) en el faldeo oriental de la precordillera, el piedemonte y la cerrillada de Mogotes (Mendoza). En ambientes serranos, cabe mencionar los trabajos de Bustos & Georgieff (2020) para los principales tributarios del río Salí en la cuenca de Tapia-Trancas y Albarracín et al. (2020) para la cuenca del arroyo Nagel en Misiones. En los sistemas serranos de la provincia de Buenos Aires, se destaca el trabajo de Camino et al. (2018), quienes analizan 12 subcuencas de la vertiente sur de Tandilia, y el de Gil et al. (2019), quienes realizan un análisis multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Grande (vertiente sur del Sistema de Ventania). Para la vertiente norte del Sistema de Ventania, Gentili (2012) realizó un estudio morfométrico de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, Moretto et al. (2019) llevaron a cabo un análisis multiescalar de subcuencas de interés de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto y Ortuño Cano & Gentili (2023) estudiaron la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande.

En la cuenca del arroyo Sauce Corto (vertiente norte del Sistema de Ventania) y principalmente en su cuenca alta (Figura 1 ocurren eventos de precipitación extrema que generan crecidas y dan lugar a inundaciones que producen efectos adversos en la población (Gentili, 2012; Moretto et al., 2019; Moretto et al., 2023b; Moretto, 2024; Ortuño et al., 2019). Al ser una cuenca no aforada, el análisis de parámetros morfométricos constituye una alternativa a fin de inferir su respuesta hidrológica, ya que permite valorar la rapidez con que sus subcuencas responden ante eventos de precipitación intensa. En este contexto, el objetivo del trabajo fue caracterizar morfométricamente las subcuencas de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto para la valoración de su potencialidad para generar crecidas. El trabajo constituye un avance en el estudio sistemático y estructurado de la morfometría fluvial a nivel de subcuenca y al mismo tiempo contribuye al conocimiento sistémico de la respuesta hidrológica de cada una de ellas, como un avance en el diagnóstico, para su aplicación en la gestión

del riesgo de inundación y anegamiento en la cuenca del arroyo Sauce Corto.

Su análisis es fundamental para comprender características físico-naturales y evaluar su comportamiento a fin de priorizar las unidades de mayor peligrosidad como una herramienta para contribuir a la gestión del riesgo de inundación y anegamiento. Esto resulta clave para la planificación y el ordenamiento ambiental, lo que favorece la organización de la sociedad y su entorno.

Materiales y métodos

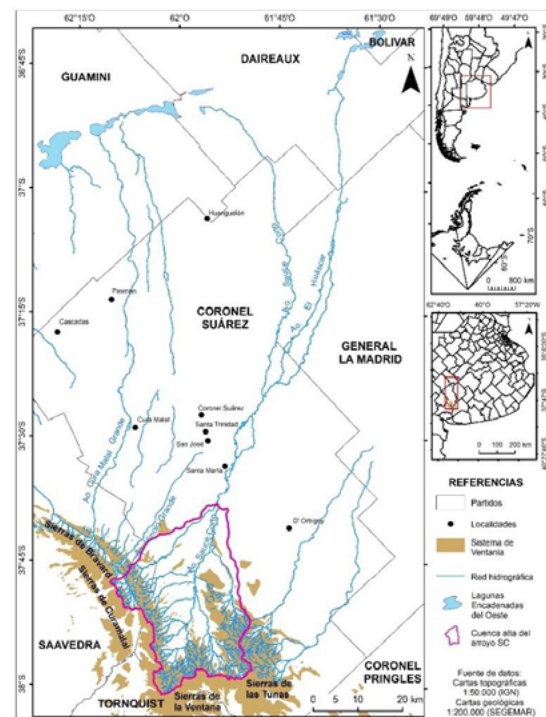
Área de estudio

La cuenca del arroyo Sauce Corto es la principal cuenca hidrográfica que se origina en la vertiente norte del Sistema de Ventania (Figura 1). Dicho sistema está formado por un conjunto de elevaciones con orientación general noroeste-sureste que constituye una unidad orográfica propia (Harrington, 1947). El aspecto estructural central son los pliegues que afectan a toda la pila estratigráfica en donde en forma subordinada aparecen las fallas (Selles Martínez, 2001). Los afloramientos fueron asignados por Harrington (1947) en tres grandes grupos de series estratigráficas pertenecientes al Paleozoico inferior (series Curamalal y Ventana) y Superior (serie Pillahuincó). En el sector del valle intermontano y en la llanura hay sedimentos del Plioceno (Terciario) y rodados del Pleistoceno (Cuaternario). Estos sedimentos también se encuentran en los valles principales hasta alturas considerables. Existen en menor medida depósitos de rodados de diferente edad. El área de estudio fue modelada por la acción fluvial, y en ella se identificaron procesos geomórficos de remoción en masa, deflación y acumulación eólica, factor clave en el diseño de la red de drenaje (Pereyra & Ferrer, 1995).

El arroyo Sauce Corto (Figura 1) drena sus aguas en sentido aproximadamente sur-norte hacia el centro de la provincia, hasta la depresión de la cuenca de las “Lagunas Encadenadas del Oeste”. Su cuenca alta se destaca por poseer una estructura de drenaje bien integrada, la cual genera un escurrimiento organizado. Más allá del piedemonte, su comportamiento se modifica dando lugar a un sistema hidrológico no típico (SHNT) en términos de Fertonani & Prendes (1983), asociado a escurrimientos de tipo mantiformes, donde el balance de agua en el suelo es principalmente vertical.

La cuenca se localiza en la franja de climas templados, registrando estaciones térmicas y pluviométricas marcadas. El régimen de precipitación se extiende de octubre a marzo

Figura 1. Área de estudio



y se presenta una estación relativamente seca de mayo a septiembre (Casado & Campo, 2019). Estas precipitaciones en general son de tipo frontal, como consecuencia del encuentro de masas de aire de distintas características. El cordón serrano actúa como una divisoria de aguas que provoca marcadas variaciones interanuales y estacionales generando un cambio en el comportamiento y los montos de las lluvias (Gentili & Gil, 2013). Su presencia genera una sobreexcitación orográfica en las precipitaciones zonales aumentando la cantidad de lluvia caída en los faldeos más expuestos a los vientos del orden de los 110 mm en casos extremos (Zapperi et al., 2007). En el área de estudio, la media anual para el período 1981-2020 es de 790,7 mm (Moretto, 2024).

La cuenca alta del arroyo Sauce Corto se encuentra en parte de los partidos de Tornquist, Saavedra y Coronel Suárez. El arroyo Sauce Corto discurre principalmente por el partido de Coronel Suárez. Sus principales localidades (Coronel Suárez, Santa Trinidad, San José y Santa María) son afectadas por lo que ocurre en la cuenca alta. En la actualidad, la vegetación original (estepa de gramíneas) es desplazada por cambios en los usos del suelo, preponderantemente actividades agrícolas-ganaderas.

Métodos y técnicas

Para la delimitación de las cuencas y el estudio de las características morfométricas se utilizó como insumo el Modelo Digital del Terreno (MDT) generado por el interpolador Topo to Raster —con una resolución de 12,5 metros—, provisto por ArcGIS 10®, a partir de la vectorización de la red hidrográfica, las curvas de nivel y los puntos acotados del área. A partir de ello, se jerarquizaron las redes de drenaje según el criterio de Strahler (1964) para delimitar las unidades de diagnóstico. Este proceso permite tener un mejor conocimiento del desarrollo del drenaje de la cuenca (Horton 1945; Strahler 1964). Una vez delimitadas las subcuencas, extraídas las redes de drenaje y jerarquizadas las mismas fue posible la identificación de tipologías de drenaje a partir de la clasificación establecida por Howard (1967). La propuesta asocia los tipos de redes a diferentes sistemas morfodinámicos, ya sea con origen en causas climáticas, litológicas, estructurales o bien combinadas (Senciales González, 1999).

Consecuentemente, se procedió a la medición y cálculo de los parámetros morfométricos básicos: área de la cuenca (A) —km²—, perímetro (P) —km—, pendiente media de la cuenca y longitud del cauce principal (Lmax) —km— con el *software* ArcGIS 10®. Asimismo, se calcularon parámetros altitudinales, específicamente las cotas máximas (H max) —m s.n.m.— y mínima (H min) —m s.n.m.—, que refieren a la cota del punto más alto y más bajo de la cuenca hidrográfica respectivamente. Ambos son parámetros utilizados para el cálculo del desnivel. Las diferencias de desnivel entre las cuencas configuran una peligrosidad diferente en cada una de ellas. Para la determinación del cauce principal de la red de drenaje se consideraron los criterios topográficos y de longitud debido a que el desnivel de una cuenca y la longitud de sus cauces tienen incidencia directa en el comportamiento hidrológico de la misma y por tanto en la propagación de crecidas (Senciales González, 1999). Este autor establece que el criterio topográfico se adopta cuando la cabecera del cauce alcanza el punto más elevado; en cambio, según el criterio de longitud, el cauce principal es aquel que se encuentra más alejado del nivel de base. El cálculo de la pendiente del curso principal es imprescindible debido a que incide directamente en la velocidad del caudal en el cauce, condiciona la energía cinética y la consecuente erosividad a lo largo del cauce (Senciales González, 1999).

Los parámetros morfométricos que permiten caracterizar las cuencas cuantitativamente se visualizan en la Tabla 1. Fueron agrupados en parámetros de forma, de relieve y relativos a la red de drenaje. Se determinaron a través

de mediciones indirectas con apoyo del *software* ArcGIS 10® y planillas de cálculo de Microsoft Excel® a partir de sus respectivas fórmulas matemáticas. En relación con los parámetros asociados a la red de drenaje cabe destacar que establecido para cada orden el número de cauces (Nu) —cantidad de segmentos de flujo de un orden particular— (Strahler, 1964), se calcularon las relaciones de bifurcación (Rb) medias para cada una de las cuencas (Tabla 1), que permiten evidenciar el grado de ramificación de la red de drenaje (Mesa, 2006). La longitud de la red hidrográfica se define por la longitud total de los segmentos de corriente individuales de cada orden y revela el tamaño característico de los componentes de la red de drenaje y sus superficies de cuenca contribuyentes (Strahler 1964). Otra característica importante de una cuenca hidrográfica, que tiene injerencia en la textura de la red hidrográfica, es la densidad del drenaje la cual depende de factores como la litología, la topografía y la vegetación (Mesa, 2006). Por otro lado, la forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial (Jardí, 1985). Se calculó la relación de elongación, de gran utilidad debido a su relación directa con los efectos hidrológicos de la cuenca (Jardí, 1985; Senciales Gonzalez, 1999). La relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo que tiene la misma área que el de la cuenca y la longitud del curso principal (Schumm, 1956). Los valores varían de 0 a 1, cuanto más se acerca a 1 más se aproxima la forma de la cuenca a un círculo y cuanto más cerca de 0 esté el valor, más elongada será. Asimismo, los parámetros asociados al relieve como la Razón de Relieve (Rr) definida por Schumm (1956) y la Relación de Relieve establecida por Melton (1957) denominada como Razón Relativa de Relieve (R) por Gregory & Walling (1973) son indicadores de relevancia de la energía cinética que presentan las cuencas. Es decir, la existencia de áreas locales con gran velocidad de los caudales y de grandes velocidades generalizadas, respectivamente. Una vez definidos, se procedió a analizar sus respectivos valores para inferir la respuesta hidrológica de la cuenca.

Resultados y discusión

Morfología fluvial: características cualitativas de la red de drenaje

La morfología fluvial es una de las características cualitativas de una red de drenaje. Para su estudio, en primer lugar, es necesario definir la jerarquización de los tramos de cauce. En función del método propuesto por Strahler (1964), la cuenca alta del arroyo Sauce Corto posee un orden jerárquico de 6. En la Tabla 2 y Figura 2 se presenta la frecuencia de las corrientes de las subcuencas según su

Tabla 1
Parámetros morfométricos

	Parámetro	Fórmula	Significado
Asociados a la red de drenaje	Relación de Bifurcación (Rb)	$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	N_u = número de cauces de orden "u" N_{u+1} = número de cauces del orden inmediato superior a "u" (Strahler, 1964)
	Relación de Longitud (Rl)	$Rl = \frac{L_u}{L_{u-1}}$	L_u = longitud media de cauces de orden "u" L_{u-1} = longitud media de cauce del orden inferior (Strahler, 1964)
	Densidad de Drenaje (Dd)	$Dd = \frac{\sum L_k}{A_k}$	$\sum L_k$ = suma de la longitud total (km) de los cauces de todos los órdenes A_k = área total de la cuenca (km ²) (Horton, 1945)
	Coefficiente de torrencialidad (Ct)	$Ct = Dd * (\frac{N_{u1}}{A})$	Dd = densidad de drenaje N_u = número de cauces de orden 1 A = área de la cuenca
Asociados a la forma	Razón de Elongación (Re)	$Re = \frac{1,129\sqrt{A}}{L_{max}}$	A = área de la cuenca L_{max} = longitud del cauce principal (Schumm, 1956)
	Desnivel absoluto (H)	$H = Hmax - Hmin$	Hmax: cota del punto más alto de la cuenca hidrográfica Hmin: cota del punto más bajo de la cuenca hidrográfica
Asociados al relieve	Pendiente del cauce principal (Pcp, %)	$Pcp = \frac{Hmax - Hmin}{Lmax}$	Hmax: cota del punto más alto de la cuenca hidrográfica Hmin: cota del punto más bajo de la cuenca hidrográfica L max: longitud del cauce principal de la cuenca hidrográfica desde el punto más distante hacia la desembocadura
	Razón de relieve (Rr)	$Rr = \frac{H}{Lmax}$	H: desnivel absoluto L max: longitud de la cuenca (Schumm, 1956)
	Relación de relieve (R)	$Rr = \frac{H}{P}$	H: desnivel absoluto P: perímetro de la cuenca (Melton, 1957)

orden. Se observa una variación del orden jerárquico de las cuencas de entre 3 y 5. Las cuencas 27 de diciembre y Pantanoso, las mayores en superficie, son las que poseen orden 5 y mayor cantidad de canales. Se observa una gran cantidad de segmentos de cauces de arroyos de orden 1 en las dos cuencas en comparación con las restantes. Esto puede deberse a la variabilidad topográfica, litológica y de cobertura de sus áreas. Ambas subcuencas presentan desniveles pronunciados y se desarrollan principalmente sobre unidades geomórficas diferenciadas, que incluyen el ambiente serrano, con grandes diferencias de altura, y el nivel de agradación pedemontano, tanto antiguo como moderno analizado por Moretto et al. (2023a). Según estos autores pueden coexistir procesos como la remoción en masa, la erosión lineal, y en algunas áreas, la incisión vertical, especialmente en las zonas de baja pendiente. Estos procesos contribuyen a la formación de una red de cauces de orden 1, más dispersa y compleja, al incrementar la actividad erosiva en estos terrenos. Por otro lado, las subcuencas en cuestión discurren sobre la

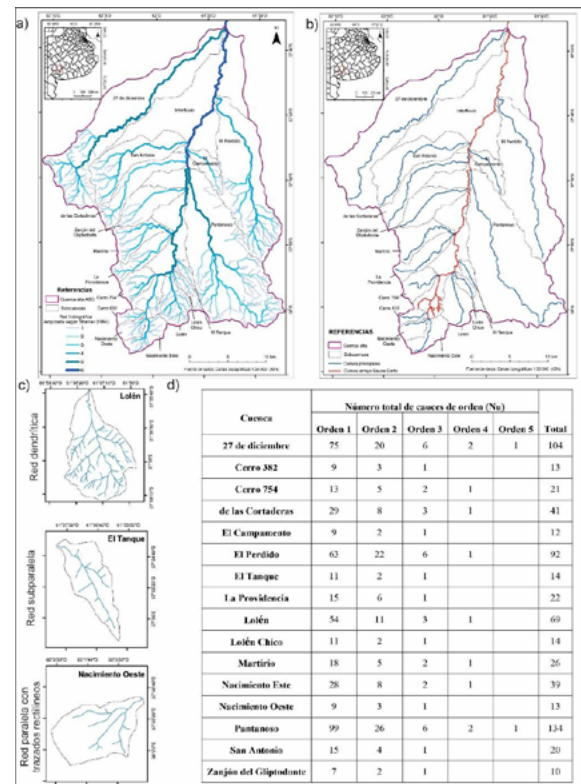
formación del grupo Ventana y sedimentos cuaternarios, que, como indican Demoulin et al. (2005), son fácilmente erosionables en relación con las litologías dominantes en otras subcuencas del Sistema de Ventania. Este aspecto puede contribuir a la formación de cauces en áreas con pendiente pronunciada, exacerbando los procesos de erosión superficial. Asimismo, tal y como plantean Nívar & Synott (2000), la cobertura vegetal en donde discurren cauces de orden 1 deben ser manejadas dado que el cambio del uso del suelo (como los destinados a actividades agropecuarias) aumenta el escurrimiento superficial y consecuentemente la pérdida de suelo. En el área, de Sá Pereira et al. (2018) confirman esta premisa y observan que se producen con frecuencia compactaciones subsuperficiales y con ello una fuerte reducción de la infiltración, provocando el aumento del escurrimiento superficial. En áreas con pendiente elevada, este aumento del escurrimiento se traduce en una mayor erosión y una mayor velocidad en el flujo, lo que favorece la formación de cauces de orden 1.

Las tipologías de las redes hidrográficas son el resultado de sistemas morfodinámicos diferentes y su análisis contribuye a la identificación de anomalías de drenaje (Gregory & Walling, 1973; Howard, 1967). Las subcuencas objeto de estudio a lo largo de su evolución compartieron las mismas condiciones climáticas. Por tanto, sus diferencias tipológicas podrían atribuirse a la conjunción de causas litológicas y estructurales (Gentili, 2012). Según la clasificación establecida por Howard (1967), se identificaron redes dendríticas, subdendríticas, paralelas y subparalelas (Figura 2), la primera es la de mayor predominancia. Un ejemplo de la red detrítica es la red hidrográfica de Lolén (Figura 2) que se desarrolla sobre afloramientos de areniscas de grano fino a mediano pertenecientes a la Fm Lolén (Harrington, 1947) en pendientes suaves. Estas características litológicas también son ejemplo de los cauces de las cuencas de Lolén Chico y El Tanque, aunque con redes subparalelas por control estructural. En concordancia con los resultados hallados por Moretto et al. (2019), la cuenca de Nacimiento Oeste tiene la particularidad de presentar una tipología del tipo paralela con trazados rectilíneos (Senciales González, 1999), discurre al igual que Nacimiento Este y Cerro 832 sobre litologías del grupo Ventana (Fm Napostá, Providencia y Lolén). A su vez, se desarrollan en áreas de elevado gradiente que junto con el control litológico condicionan las tipologías de sus redes de drenaje. A diferencia de Nacimiento Oeste (Figura 2), las otras dos cuencas presentan una red subdendrítica con trazados angulosos ocasionados por el control litológico del mencionado grupo. Una vez jerarquizadas las subcuencas, es posible determinar para cada una de ellas el cauce principal siguiendo a Senciales González (1999). El criterio de mayor predominancia para definir el curso principal coincide con el longitudinal y topográfico por lo que el cauce en dichas cuencas es aquel que posee mayor longitud y cuya cabecera alcanza la máxima altura (Figura 3b).

Morfometría fluvial de las subcuencas del arroyo Sauce Corto

Un parámetro de gran interés es el área de una cuenca, a partir del cual se derivan parámetros que permiten establecer una clasificación en cuanto a su tamaño (Chow et al., 1994; Jardí, 1985). La cuenca Pantanoso es la de mayor superficie con 149,73 km², le siguen en orden 27 de diciembre (127,45 km²) y El Perdido (100,43 km²), las cuales tenderán a recoger mayor cantidad de precipitación. Las cuencas El Tanque, Lolén Chico y Cerro 832 son las de menor tamaño (Tabla 2). Las superficies de este último grupo de cuencas, por sí solas, presuponen tiempos de concentración de la escorrentía superficial menores y por tanto la posibilidad de experimentar crecidas es mayor,

Figura 2. a) Red hidrográfica de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, b) cursos principales del arroyo Sauce Corto y de subcuencas, c) tipologías de subcuencas de interés, y, d) frecuencia de cauces de subcuencas según su orden



Fuente: Figura 2.a) Gentili (2012).

con hidrogramas de picos pronunciados y corta duración. El perímetro de una cuenca es un parámetro que se encuentra estrechamente vinculado al área de la misma ya que es directamente proporcional (Senciales González, 1999). El valor máximo se encontró para la cuenca 27 de diciembre y el valor más bajo para Lolén Chico (Tabla 3). La correlación entre el área y el perímetro de las subcuencas es de 0,95, lo que indica una relación positiva fuerte, por lo que a medida que el área aumenta el perímetro también. Esta afirmación refleja una alta dependencia entre ambos parámetros. La longitud del cauce principal incide en el comportamiento hidrológico de la misma. Al igual que el resto de los parámetros, es determinante para el cálculo de la mayoría de los parámetros morfométricos. En términos generales, una extensa longitud implica una concentración paulatina a lo largo del colector, disipando la energía de la crecida rápidamente, y una reducida longitud producirá menor retardo y mayor energía concentrada (Senciales González, 1999). Se observa en la Tabla 2 que las cuencas que presentan la mayor longitud de su cauce principal se corresponden con las de mayor superficie: 27 de

Tabla 2
Parámetros morfométricos

Cuenca / Parámetro	A (km ²)	P (km)	L max (km)	H max (m s.n.m.)	H min (m s.n.m.)
27 de diciembre	127,45	79,75	39,62	906	260
Cerro 832	4,89	11,26	3,91	931	405
Cerro 754	13	16,2	5,96	867	365
de las Cortaderas	48,17	38,25	18,43	830	288
El Campamento	12,64	19,08	8,05	411	289
El Perdido	100,43	55,44	26,11	616	275
El Tanque	4,58	10,94	4,27	444	345
La Providencia	18,11	22,78	10,58	914	328
Lolén	19,35	19,46	7,96	627	348
Lolén Chicov	4,61	10,61	4,44	472	347
Martirio	20,12	23,37	10,7	925	327
Nacimiento Este	13,32	18,24	5,51	951	406
Nacimiento Oeste	7,59	11,71	3,38	973	408
Pantanososo	149,73	62,26	30,64	751	296
San Antonio	32,55	36,14	17,93	932	290
Zanjón del Gliptodonte	25,34	24,71	11,03	766	303

diciembre (39,62 km); Pantanososo (62,26 km) y El Perdido (55,44 km). Las corrientes con longitudes menores como la cuenca Nacimiento Oeste (3,38 km) son características de áreas con pendientes más pronunciadas. Las cotas máximas y mínimas son parámetros utilizados para el cálculo de otros parámetros. Los valores oscilan entre los 973 m s.n.m. y los 260 m s.n.m. Nacimiento Oeste presenta el valor máximo de la cota y 27 de diciembre la cota mínima más baja.

Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

En general, una red hidrográfica presenta una buena jerarquización cuando posee relaciones de bifurcación homogéneas, caso contrario marca la posible existencia de anomalías de drenaje (Senciales González, 1999). En este sentido, se observan diferencias notables para algunas cuencas en los valores del parámetro (Tabla 3). La Rb entre órdenes de las subcuencas varía de 1,9 a 4,3, lo que responde a las variaciones topográficas y litológicas presentes en las unidades de diagnóstico. Las variaciones topográficas, como los desniveles y la pendiente del terreno, influyen directamente en la distribución de los cauces, favoreciendo su concentración y su dispersión en áreas de mayor y menor pendiente respectivamente. Por otro lado, las características litológicas de las subcuencas afectan la capacidad del terreno para escurrir el agua, lo que influye en la erosión y en la formación de cauces. Solo las cuencas Nacimiento Oeste y Cerro 832 representan casos de jerarquización ideal dado que sus redes discurren por terrenos de alto gradiente, lo que refuerza lo ya

planteado por Gentili (2012). El resto presenta Rb puntuales no homogéneas, cuyas diferencias pueden atribuirse a diferencias litológicas como plantean Gil et al. (2009) y Gentili (2012). En cuanto a los valores medios obtenidos para este parámetro, La Providencia presenta el valor más alto (4,3), seguida por El Perdido con 4,2 (cuencas de orden 3 y 4, respectivamente). Strahler (1964) sugiere que valores superiores a 4 indican una torrencialidad alta. En el otro extremo se encuentran la cuenca de Cerro 754 (orden 4) con un valor de 1,9, lo cual sugiere un mayor retardo en la generación de crecidas. Los valores obtenidos reflejan que casi todas las cuencas a excepción de Cerro 754, Martirio, Nacimiento Este y Zanjón del Gliptodonte exhiben valores típicos (de entre 3 y 5) para los sistemas fluviales donde la estructura geológica puede no distorsionar el patrón de drenaje natural. En cambio, valores próximos a 2 revelan áreas de escaso relieve con baja potencialidad de inundación (Senciales González, 1999; Strahler, 1964).

Generalmente, la longitud total de los segmentos de flujo en el primer orden es más alta y disminuye a medida que aumenta el orden de flujo (Horton, 1945). Las longitudes totales de las corrientes de las redes de drenaje estudiadas son de magnitudes importantes, con valores de entre 8,11 km y 159,30 km, y un promedio de 40,39 km. En la Tabla 5 se presentan los valores de la Relación de Longitud. Esta se considera complementaria de la razón de bifurcación, dado que la longitud media de los cursos se incrementa entre 2 y 3 veces al aumentar el número de orden (Romero Días & López Bermúdez, 1987). La mayoría de las

Tabla 3

Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

Cuenca	Parámetros asociados a la red de drenaje					
	Lu	Rb media	RI media	Dd	Fs	Ct
27 de diciembre	111,29	3,02	5,93	0,87	0,59	0,51
Cerro 832	8,11	3,00	2,37	1,66	1,84	3,05
Cerro 754	16,79	1,87	2,28	1,29	1,00	1,29
de las Cortaderas	44,52	3,10	3,45	0,92	0,60	0,56
El Campamento	14,31	3,25	3,28	1,13	0,71	0,81
El Perdido	97,15	4,18	4,44	0,97	0,63	0,61
El Tanque	8,70	3,75	2,58	1,90	2,40	4,56
La Providencia	23,21	4,25	6,60	1,28	0,83	1,06
Lolén	44,76	3,86	2,38	2,31	2,79	6,45
Lolén Chico	10,52	3,75	2,20	2,28	2,39	5,44
Martirio	29,39	2,70	2,51	1,13	0,89	1,01
Nacimiento Este	23,36	2,67	1,74	1,75	2,10	3,69
Nacimiento Oeste	10,52	3,00	1,53	1,39	1,19	1,64
Pantanosos	159,30	3,29	2,23	1,06	0,66	0,70
San Antonio	31,38	3,88	9,98	0,96	0,46	0,44
Zanjón del Gliptodonte	19,60	2,75	2,61	0,77	0,28	0,21

cuenas analizadas presentan bajas relaciones medias de este parámetro (valores menores a 3) lo que según Sala & Gay (1981) indica una mayor concentración de energía en eventos de grandes avenidas. Son excepciones de esta generalización las unidades San Antonio, la cual presenta el mayor valor de RI medio (9,98), seguida por La Providencia (6,60), 27 de diciembre (5,93), El Perdido (4,44), de las Cortaderas (3,45) y El Campamento (3,28). Según Senciales (1999), elevados valores de este parámetro, es decir mayor a 3, revelan una concentración paulatina de caudales a lo largo del colector principal.

En relación con la densidad de drenaje, es un parámetro de relevancia para comprender la disección del paisaje y el potencial de escorrentía de la cuenca (Horton, 1932). Los valores de este parámetro en el área de estudio varían entre los 2,31 km/km² (Lolén) y los 0,77 km/km² (Zanjón del Gliptodonte) (Tabla 3). Según Strahler (1964) y Senciales Gonzalez (1999), los mismos representan una baja densidad de drenaje y una textura gruesa. Esta característica está asociada a zonas de rocas masivas, así como materiales (arenas y/o gravas) permeables y con moderada infiltración, inferencias inferidas por Gil et al. (2009). En términos generales, una menor densidad de drenaje implica un tiempo de concentración prolongado y por consiguiente mayores oportunidades de infiltración de agua, lo cual implica volúmenes de inundación decrecientes (Pallard et al., 2009). La cuenca de Lolén discurre en su totalidad por la formación más joven del Grupo Ventana, la Fm. Lolén, conformada por areniscas micáceas esquistosas de

grano fino a mediano fácilmente erosionables (Demoulin et al., 2005; Harrington, 1987). A este análisis, se suma en gran medida la existencia de pendientes moderadas en la cuenca, lo que explica la intensidad de los procesos de escorrentía no concentrada (Senciales Gonzalez, 1999). Como afirma Tricart (1965), el valor más importante es el del primer orden, indicador de un mayor poder erosivo. Se espera que la respuesta de la cuenca a una tormenta sea más rápida para evacuar el exceso de agua. No obstante, cuando el agua llega a arroyos que poseen baja jerarquización se puede producir un aumento de los tiempos de concentración. Sin embargo, el tiempo de respuesta entre la precipitación y el pico de crecida, y la duración del caudal de la tormenta puede ser más larga.

En función de la densidad de drenaje y el índice de frecuencia es posible determinar el coeficiente de torrencialidad (Ct). Permite obtener una aproximación al estudio de máximas crecidas ya que está relacionado con la capacidad de descarga de una cuenca (Senciales González, 1999). A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Díaz & López Bermúdez, 1987), evidenciada por la mayor longitud de ríos de orden 1 que está íntimamente ligada a la intensificación de la erosión (Díaz Gómez et al., 2017). Los resultados se correlacionan con los parámetros anteriores, por tanto a mayor Dd e IF mayor será la torrencialidad de la cuenca. Los valores oscilan entre los 6,45 (Lolén) y los 1,96 (Zanjón del Gliptodonte) (Tabla 3). Altos valores de estos parámetros por tanto implican una elevada

susceptibilidad a la erosión, menores tiempos de llegada al pico y por ende una alta torrencialidad y probabilidad de crecidas espontáneas.

Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca

Los parámetros de forma asociados a cada subcuenca se observan en la Tabla 4. Los valores de ancho y longitud sugieren sistemas con tendencia al crecimiento longitudinal o lateral de una cuenca (Jardí, 1985). Aquellas cuencas con altos valores de estos parámetros evidencian un crecimiento lateral como las cuencas de Pantanoso, El Perdido y 27 de diciembre (Méndez et al., 2015).

Los resultados del parámetro de relación de elongación en las cuencas analizadas varían entre los 0,32 (27 de diciembre) y los 0,92 (Nacimiento Oeste) (Tabla 5). Las subcuencas que poseen el valor más bajo de este parámetro son, además de 27 de diciembre, las de San Antonio 0,36, El Perdido y de las Cortaderas con 0,43, La Providencia y Pantanoso con 0,45, y Martirio con 0,47. Esto indica la morfología alargada de las mismas. En general, los parámetros más bajos suelen observarse en áreas de gran meandrización y baja pendiente (Senciales González, 1999), situación que no se vislumbra para La Providencia y Martirio (producto de los altos gradientes). Los valores obtenidos se corresponden con los hallados por Gentili (2012). Al igual que las consideraciones de este autor, se trata de cuencas con un gran desarrollo longitudinal de su curso principal, que al ingresar al piedemonte serrano se caracterizan por ser alóctonos y discurrir sobre bajas pendientes. Por tanto, los valores bajos hallados para este parámetro pueden indicar un retardo de la concentración de la escorrentía lo que determina una mayor brusquedad de la crecida cuando las aguas se concentran (Senciales González, 1999). De todas las subcuencas, es posible observar que la cuenca de Nacimiento Oeste, con un valor de 0,92, es la que presenta una forma más redondeada, siguiéndole en orden decreciente Nacimiento Este con un valor de 0,75; Cerro 754 con 0,68 y Cerro 832 con 0,64 (Tabla 4). Ello supone una incorporación más rápida de la escorrentía a los cursos de agua y por lo tanto un menor tiempo de concentración, velocidad que se incrementa en áreas de fuertes pendientes, donde se espera que la crecida sea súbita (Senciales González, 1999). Por lo tanto, al tratarse de cuencas que se encuentran en el sistema serrano, cabe esperar que ante la ocurrencia de crecidas repentinas en las redes de drenaje de las mismas aumenten el volumen de agua del cauce principal del arroyo Sauce Corto afectando a vastos sectores de la cuenca media y baja. Gregory & Walling (1973) plantean que cuanto más redondeada es una cuenca, menor será la razón de

Tabla 4

Parámetros morfométricos asociados a la forma de la cuenca

Cuenca	Parámetros asociados a la forma de la cuenca	
	Ap	Re
27 de diciembre	3,22	0,32
Cerro 832	1,25	0,64
Cerro 754	2,18	0,68
de las Cortaderas	2,61	0,43
El Campamento	1,57	0,50
El Perdido	3,85	0,43
El Tanque	1,07	0,57
La Providencia	1,71	0,45
Lolén	2,43	0,62
Lolén Chico	1,04	0,55
Martirio	1,88	0,47
Nacimiento Este	2,42	0,75
Nacimiento Oeste	2,25	0,92
Pantanoso	4,89	0,45
San Antonio	1,82	0,36
Zanjón del Gliptodonte	2,30	0,52

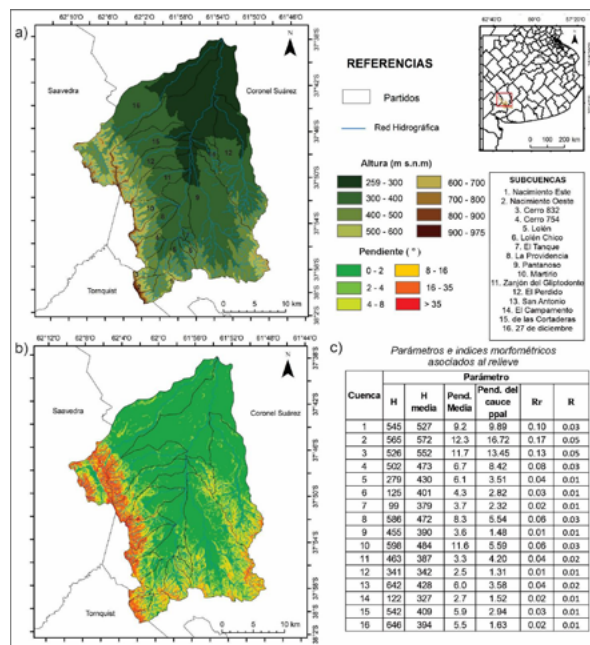
bifurcación y mayor la peligrosidad de crecidas bruscas en la desembocadura.

Parámetros morfométricos asociados al relieve

El relieve de la cuenca depende de las características litológicas, estructurales y geomorfológicas de la región en la que se encuentra. Los parámetros asociados al relieve se presentan en la Figura 3. El área de estudio presenta una altura máxima de 973 m s.n.m. y una cota mínima de 260 m s.n.m. en la confluencia del arroyo 27 de diciembre con el arroyo Sauce Corto (Figura 3). Los valores del cálculo de la pendiente del curso principal oscilan entre los 1,3 % (El Perdido) y los 16,7 % (Nacimiento Oeste). Esta última cuenca junto con Cerro 832 (13,5 %) y Nacimiento Este (9,9 %), todas ubicadas en las nacientes, representan los cauces más empinados del arroyo Sauce Corto.

La pendiente del terreno es un parámetro relevante en el conocimiento de la complejidad de las formas del relieve (Senciales González, 1999). Los valores medios calculados ($2,5^{\circ}$ - $12,3^{\circ}$) de las subcuencas representan gradientes bajos a moderados según Van Zuidam (1985) (Figura 3). Las cuencas Nacimiento Oeste, Cerro 832 y Martirio (ubicadas en la margen occidental del curso principal del arroyo Sauce Corto, en las nacientes del mismo, Figura 2a), poseen los mayores gradientes, los cuales contribuyen a la activación de procesos erosivos y una mayor potencialidad de generar crecidas. Asimismo, la pendiente de sus cursos principales es acusada. En aquellas unidades en las cuales

Figura 3. a) Altimetría, b) gradiente de pendientes y c) parámetros asociados al relieve para la cuenca alta del arroyo Sauce Corto



el desnivel de la cuenca aumenta, mayor será la posibilidad de generar crecidas. Esta afirmación se visibiliza en las cuencas antes mencionadas. Este grupo se desarrolla sobre el área serrana y sus marcados desniveles definen relieves accidentados y más fuertes que dan lugar a una variabilidad de sus gradientes de pendientes en comparación al resto de las subcuencas. Estas diferencias altitudinales y de pendiente provocan contrastes significativos en las superficies de las cuencas, lo que, a su vez, disminuye la energía cinética en las cuencas de menor pendiente. En las cuencas con pendientes medias más bajas, como es el caso de El Perdido (2,5°) o El Campamento (2,7°), la velocidad del flujo tenderá a ser menor, dando lugar a una menor energía cinética, mientras que las cuencas con pendiente pronunciada tienden a registrar mayor velocidad de flujo, esperándose tiempos de concentración más cortos hasta el pico del hidrograma (Bhat et al., 2019; Masoud, 2016). En la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, los valores de pendiente de mayor frecuencia (21,47% y 32,92%) se encuentran entre los rangos de 0° - 2° y 2° - 4°, respectivamente. No obstante, se visibiliza una frecuencia de un 24,58% de gradientes de los tres últimos rangos, lo cual favorece la aceleración del flujo de la corriente dada las diferencias de alturas analizadas.

La Razón de Relieve (Rr) y la Relación de Relieve son indicadores de relevancia de la energía cinética y sus resultados deben interpretarse de manera conjunta

(Senciales González, 1999). Según este autor con el primero de los parámetros se obtiene la pendiente máxima de la cuenca y con el segundo la pendiente media. En aquellas subcuencas con altos valores de los mismos se espera una rápida concentración de las aguas. Es el caso de Nacimiento Oeste (Rr= 0,15 y R= 0,48), Cerro 832 (Rr= 0,03 y R= 0,38) y Nacimiento Este (Rr= 0,02 y R= 0,09).

Conclusiones

El estudio de las características morfométricas en cuencas no aforadas es de gran relevancia debido a que posibilita relacionar las características físicas e hidrológicas de cuencas de drenaje y realizar inferencias respecto a su potencialidad para generar crecidas. Para evaluar los factores condicionantes de la dinámica fluvial de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto a nivel de subcuencas, se delimitaron dieciséis subcuencas con órdenes que varían entre 3 y 5. La superficie de las subcuencas varía entre los 149,82 km² (Pantanosos) y los 4,58 km² (Lolén Chico). Los valores de altitud oscilan entre los 975 m s.n.m. y los 269 m s.n.m. y es Nacimiento Oeste la que presenta la cota máxima y 27 de diciembre la cota más baja. Las variables asociadas a la red de drenaje, a la forma y al relieve permitieron inferir que las cuencas de la margen occidental del curso principal del arroyo Sauce Corto presentan la mayor potencialidad para generar crecidas. Se observó que las subcuencas con gradientes pronunciados, como Nacimiento Oeste, Cerro 832 y Nacimiento Este, tienen una mayor tendencia a generar crecidas súbitas debido a sus altas pendientes, formas relativamente compactas y una dinámica de escorrentía acelerada inferida a través de los parámetros asociados a la red de drenaje. Estas condiciones no solo incrementan la peligrosidad de crecidas (e inundaciones aguas abajo), sino que también exacerban procesos erosivos, contribuyendo a la degradación de suelos y al aumento de la sedimentación en los cauces. Estas características requieren una atención prioritaria para prevenir daños significativos en áreas expuestas a la dinámica torrencial de estas subcuencas.

Lolén, Lolén Chico y el Tanque tienen la particularidad que su desnivel y su altura media no son tan abruptas, sino que rondan los valores más bajos dentro de la cuenca. Su jerarquización, su forma, su pendiente media y su superficie sobre gradientes medios de pendiente permiten inferir que ante precipitaciones extremas se esperan picos de crecidas bruscos, pero de menores proporciones que las subcuencas del grupo anterior.

En cuencas como Zanjón del Gliptodonte y 27 de diciembre donde la pendiente máxima es elevada, sucede que el

valor medio decrece contribuyendo a que los picos de crecidas sean menos violentos debido también a que sus superficies discurren principalmente sobre gradientes bajos de pendiente. De las Cortaderas, Providencia y San Antonio presentan valores no tan significativos en relación con los parámetros del relieve lo que determina que la peligrosidad de ocurrencia de crecidas sea menor. Dadas las características topográficas analizadas de las cuencas de El Campamento, El Perdido y Pantanoso se infiere que la potencialidad para generar crecidas es menor.

Por otro lado, hay que destacar que las subcuencas como El Perdido, Pantanoso y 27 de diciembre con pendientes más suaves, aunque tienen una menor velocidad de flujo y tiempos de concentración más largos, también presentan peligrosidad ante la ocurrencia de un evento de precipitación intensa. En este contexto, la menor energía cinética de las aguas tiende a generar crecidas más lentas, lo que puede desencadenar procesos de endorreísmo o anegamientos. Este fenómeno afecta a las poblaciones y actividades de la zona de manera diferencial, por lo que se requieren estrategias de gestión diferenciadas para mitigar este riesgo. Asimismo, hay que destacar que los desbordes más relevantes en estos arroyos, se observan en las márgenes de sus cursos principales, en proximidades a su confluencia con el curso principal del arroyo Sauce Corto. Estos sectores son áreas de relevancia para la sociedad por la complejidad que revisten, ya que se corresponden con zonas de producción y accesibilidad para la región.

La metodología aplicada, de amplio y vigente desarrollo a nivel mundial, es fácilmente extrapolable a cuencas no aforadas. La aplicación de los parámetros morfométricos seleccionados contribuyó a caracterizar la dinámica hídrica de la cuenca. El cálculo de los mismos posibilita obtener aquellas subcuencas con mayor peligrosidad para generar crecidas. Su estudio, por tanto, constituye una herramienta para la elaboración e implementación de medidas locales de gestión del riesgo de inundación y anegamiento.

Financiamiento

PGI “Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas ambientales a diversas escalas témporo- espaciales” (24/G092) (SGCyT-UNS). Beca Interna de Finalización de Doctorado (CONICET) 2021 – 2024 de la doctora Belén Moretto.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

Declaración de autoría

Belén Moretto: Conceptualización, Curación de datos,

Análisis formal, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – borrador original.

Jorge Osvaldo Gentili: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción – revisión y edición.

Referencias

- Abdeta, G. C., Tesemma, A. B., Tura, A. L., & Atlabachew, G. H. (2020). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and practices in Gidabo Basin, Southern Rift Valley of Ethiopia. *Appl Water Sci.*, 10, 158. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01239-7>
- Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575-576, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047>
- Albarracín F. S., Alvarenga F., Sanclement, E., & Pauluzek, A. (2020). Aspectos morfológicos de la cuenca del arroyo Nagel (Misiones, Argentina). *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 2(2), 81-89. <https://doi.org/10.36995/j.masingenio.2021.02.02.007>
- Bhat, M. S., Alam, A., Ahmad, S., Farooq, H., & Ahmad, B. (2019). Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. *Environmental Earth Sciences*, 78(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8046-1>
- Bustos, M. S., & Georgieff, S. M. (2020). Análisis morfométrico de los principales tributarios del río Salí en la cuenca de Tapia - Trancas a partir del procesamiento en SIG y sensoramiento remoto. *Acta Geológica Lilloana*, 32(1-2), 27-46. <https://doi.org/10.30550/j.agl/2020.32.1-2/2>
- Çadraku, H. (2023). Morphometric analysis of Llap River watershed (Kosovo). *Roman. J. Geography*, 67(1), 33-49. <https://doi.org/10.59277/rrg.2023.1.04>
- Camino, M. A., Juliana Bó, M., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., del Río, J. L., & 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. <https://www.redalyc.org/journal/3832/383257036005/html/>

- 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>
- Castillo-Cruz, Z. G., & Medrano-Pérez, O. R. (2023). Análisis geomorfológico de las subcuencas Usumacinta y Grijalva en el sureste de México. *Acta universitaria*, 33. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3684>
- Chakraborty, S. (2023). Application of Basin Morphometry for Hydro-geomorphological Implications: A Study of the Indo-Bhutanese Duduya Watershed. *Journal of the Geological Society of India*, 99(4), 473-486. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2335-8>
- Das, S. (2019). Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.*, 14, 60-74. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.006>
- Del-Águila, S. & Mejía, A. (2021). Morphometric characterization of two high Andean basins of Peru using Geographic Information Systems. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12 (2), 1-20. <https://revistatyc.a.org.mx/index.php/tyca/article/view/2235>
- 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>
- Esper Angillieri, M. Y., & Fernández, O. M. (2017). Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation of basins. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 150-156. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742017000200150&script=sci_abstract&tlng=en
- Fertonani, M., & Prendes, H. (1983). Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos. En M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las Grandes Llanuras. Coloquio de Olavarría* (pp. 119-155). UNESCO. Secretaría Nacional de Recursos Hídricos.
- Gaurav Singh, V., & Singh, S. K. (2024). Analysis of geo-morphometric and topo-hydrological indices using COP-DEM: a case study of Betwa River Basin, Central India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 8(2), 101-128. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2097376>
- Gautam, P. K., Singh, D. sen, Kumar, D., & Singh, A. K. (2021). A GIS-based Approach in Drainage Morphometric Analysis of Sai River Basin, Uttar Pradesh, India. *Journal of the Geological Society of India*, 95(4), 366-376. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1445-9>
- Gentili, J. O. (2012). *Hidrografía del Arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de las inundaciones y anegamientos* [Tesis de doctorado]. Departamento de Geografía y Turismo, 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(1-2), 147-166. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383239184008>
- Gil, V., Gentili, J., & Campo, A. M. (2009). Influencia de la litología en la variación de los parámetros morfométricos, Sistema de Ventania, Argentina. *Papeles de Geografía*, 49-50, 55-68. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/92381>
- Gil, V., Volonté, 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 Geomorfologia*, 20(4), 811-824. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1598>
- Gregory, K. L., & Walling, D. E. (1973). *Drainage basin. Form and process: a geomorphological approach*. Ed. E. Arnold.
- 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. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/568>
- Horton, R. E. (1932). Drainage Basin Characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. (1945). Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphologie. *Geological, Society of America*, 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)

- Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a simulation. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 51, 2246-2259. <https://doi.org/10.1306/5D25C26D-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Summary for Policymakers. In Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Ismail, M., Singh, H., Farooq, I. & Yousuf, N. (2022). Quantitative morphometric analysis of Veshav and Rembi Ara watersheds, India, using quantum GIS. *Appl. Geomat.*, 14 (2), 119-134. <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00417-3>
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41-68. <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/download/45789/56812>
- Luís Reis, I., Sousa Marinho, G., da Silva Rios, G., Brandão Santana, D., Henrique Expedito Lense, G., Luiz Mincato, R., & Rubira, F. G. (2023). Morphometric parameters of the relief and drainage network of a tropical subbasin. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i2.2311>
- Masoud, M. H. (2016). Geoinformatics application for assessing the morphometric characteristics' effect on hydrological response at watershed (case study of Wadi Qanunah, Saudi Arabia). *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 280. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-015-2300-y>
- Kant, C., Kumar, G. & Meena, R. S. (2023). Modeling morphometric and geomorphological parameters of mountainous river basin for water resource management using remote sensing and GIS approach model. *Earth Syst. Environ.*, 9 (2), 2151-2163. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01614-0>
- Melton, M. A. (1957). *An analysis of the relation among elements of climate, surface properties and geomorphology*. Office of Naval Research Project NR389-04.
- Méndez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., & León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 133-156. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcdg/v24n2/v24n2a8.pdf>
- Mesa, L. M. (2006). Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environmental Geology*, 50(8), 1235-1242. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-006-0297-y>
- Moreira Braz, A., Mirándola García, P. H., Pinto, A. L., Salinas Chávez, E., & Oliveira, I. J. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Moretto, B. (2024). *Inundaciones y anegamientos: riesgo y su gestión en la cuenca alta y media del arroyo Sauce Corto y localidades próximas del partido de Coronel Suárez (Buenos Aires, Argentina)* [Tesis de doctorado]. Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.
- Moretto, B., Gentili, J. O., & Campo, A. M. (2023a). Morfología de vertientes en áreas serranas: cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Argentina). *Revista Geográfica Digital*, 20, 3-19. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/223349>
- Moretto, B., Gentili, J. O. & Campo, A. M. (2023b). El relieve como un factor de la peligrosidad de inundación en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina). *Cuadernos de Geografía*, 111. <https://doi.org/10.7203/CGUV.111.26542>
- Návar, J., & Synnott, T. J. (2000). Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. *Terra Latinoamericana*, 18(3), 255-262. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57318309>

- Oliveira, M., Santos, L. J. C., & Oliveira, J. G. de. (2023). Morfometria e evolução de feições erosivas de grandes dimensões no Noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i2.2320>
- Ortuño Cano, M. Á., Gentili, J., Moretto, B., & Campo, A. (2019). Eventos de exceso hídrico en la prensa escrita (Sistema de Ventania, Argentina). *Boletín Geográfico*, 1(41). <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/2366>
- Ortuño Cano, M. de los Á., & Gentili, J. O. (2023). Análisis morfométrico de la cuenca alta del arroyo Cura Malal Grande (Argentina) aplicado a la susceptibilidad de generar crecidas fluviales. *Investigaciones Geográficas*, 66, 48-64. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2023.70111>
- Pallard, B., Castellarin, A., & Montanari, A. (2009). A look at the links between drainage density and flood statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1019-1029. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1019-2009>
- Patil, S. K. & Bhagwat, T. N. (2023). Morphometric analysis and hydrological inferences for water resource management in Warana River basin of Maharashtra, India, using remote sensing and GIS. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 45 (1), 113-120. <https://sjst.psu.ac.th/journal/45-1/15.pdf>
- 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.
- Prakasam, C., Aravinth, R., Kanwar, V. S. & Nagarajan, B. (2021). Sustainable water resource management using watershed morphometry-a case study of Giri River Catchment, Himachal Pradesh, India. In *Geographic Information Science for Land Resource Management* (pp. 229-250). <https://doi.org/10.1002/9781119786375.ch12>
- Quiroga, D. R. A., Gil, V., & Coronato, A. (2017). Quantitative geomorphology applied to fluvial dynamic in Aviles and Moneta basins, Tierra Del Fuego, Southern Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 188. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6494-z>
- Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality, and geospatial techniques. *Watershed Ecology and the Environment*, 6, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.12.001>
- Romero Díaz, M. A., & López Bermúdez, 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. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in bad lands at Perth, Amboi, New Yersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Sellés Martínez, J. (2001). Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires (Argentina) The geology of Ventania (Buenos Aires Province, Argentina). *Journal of Iberian Geology*, 27, 43-69. <https://core.ac.uk/reader/38808120>
- Senciales González, J. M. (1999). *Redes fluviales. Metodología de análisis*. Universidad de Málaga.
- Simonetti, V. C., Silva, D. C. da C. E., & Rosa, A. H. (2022). Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1). <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2037>
- Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655-668. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union*, 38, 913-920. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology compendium of water-resources technology* (pp. 39-76). McGraw-Hill.
- Tola, S. Y., & Shetty, A. (2022). Flood susceptibility modeling based on morphometric parameters in Upper Awash River basin, Ethiopia using geospatial techniques. *Sustainable Water Resources Management*, 8(2), 49. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00642-z>
- Tricart, J. (1965). *Principal Methods of Geomorphology*. Masson.

- United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR]. (2022). *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2022: Nuestro mundo en peligro: Transformar la gobernanza para un futuro resiliente*. Resumen para responsables de políticas. <https://www.undrr.org/gar/gar2022-our-world-risk-gar>
- Van Zuidam, R. A. (1985). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits, The Hague.
- Vich, A. I., Pasquali, E. L. V., Otta, S. A., Lauro, C., & Bastidas, L. B. (2021). Morphometric analysis of basins located in the piedmont of central Western Argentina. *Cuadernos Geograficos*, 60(1), 295-312. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i1.9639>
- Zapperi, P., Ramos, M., Gil, V., & Campo, A. M. (2007). Caracterización de las precipitaciones estivales en el Suroeste bonaerense. *Contribuciones Científicas*, 1(2), 483-491. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/94838>