

7

Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)¹

Belén Moretto², Jorge Osvaldo Gentili³ y Alicia María Campo⁴

Universidad Nacional del Sur

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

@ [belen.moretto@uns.edu.ar] | [jogentili@uns.edu.ar] | [amcampo@uns.edu.ar]

RECIBIDO: 03-06-2019

ACEPTADO: 10-08-2019

Cita sugerida: Moretto, B., Gentili, J.O. y Campo, A.M. (2019). Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina). Revista *Huellas*, Volumen 23, N° 2, Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. Recuperado a partir de: <http://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas>

DOI: <http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2019-2316>

Resumen

En la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (vertiente norte del Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires, Argentina), frecuentemente ocurren eventos extremos de precipitación que generan crecidas y dan lugar a inundaciones que afectan el desarrollo socio-económico del partido de Coronel Suárez. A fin de inferir la respuesta hidrológica del área de interés, es necesario el análisis de parámetros e índices morfométricos que permitan estudiar el peligro de inundación de las cuencas. Por lo expuesto, el objetivo del trabajo es identificar las variaciones de la respuesta hidrológica de cuencas de interés en función de los parámetros e índices morfométricos obtenidos de distintas fuentes de datos y escalas. Los re-

- 1 Trabajo realizado en el marco del Proyecto de Investigación “Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas a diversas escalas témporo-espaciales”. Financiamiento: SGCyT-UNS (24/G078).
- 2 Licenciada y Profesora en Geografía. Becaria Doctoral de la Universidad Nacional del Sur. Ayudante de Docencia A en el Curso-Taller Enseñanza de la Geografía del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur.
- 3 Dr. en Geografía y Especialista en Sistemas de Información. Profesor Adjunto de Climatología del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur. Investigador Asistente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- 4 Dra. en Geografía. Investigadora Principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

sultados del análisis multiescalar evidencian el peso de los procesos de generalización cartográfica asociados a la escala de semidetalle. En términos del análisis de la respuesta hidrológica es posible inferir que el uso de la escala 1:50.000 puede llevar a la subestimación de la torrencialidad de las cuencas y en consecuencia, de su grado de peligrosidad.

Palabras clave: Morfometría fluvial; Inundaciones; Sauce Corto; Coronel Suárez.

Morphometric multiple-scale analysis in the upper basin of the Sauce Corto stream (Buenos Aires, Argentina)

Abstract

In the high basin of the Sauce Corto stream (in the Northern watershed of Ventania System in the Province of Buenos Aires), there are frequent extreme precipitation events, which generate floods that affect the socio-economic development of Coronel Suárez district. In order to infer the hydrological response of the area, it is necessary to analyze the parameters and morphometric indexes that allow for the study of potentially dangerous basins flood. Accordingly, the aim of this paper is to identify variations in the hydrological response of different basins, according to parameters and morphometric indexes obtained from various data and scale sources. The multiple-scale analysis results show the importance of cartographic generalization processes associated to semi detail scaling. In the analysis of the hydrological response it is possible to infer that the use of 1:50.000 scale will possibly underestimate the basins torrentiality and, consequently, its potential danger.

Key words: Fluvial morphometry; Floods; Sauce Corto; Coronel Suárez.

Análise morfométrica multiescala na bacia alta do arroio Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)

Resumo

Na bacia alta do arroio Sauce Corto (vertente norte do Sistema de Ventania, província de Buenos Aires, Argentina), frequentemente ocorrem eventos extremos de precipitação que geram crescidas e dão lugar a inundações que afetam o desenvolvimento sócio econômico do partido de Coronel Suarez. Com o fim de inferir a resposta hidrológica da área de interesse é necessário a análise de parâmetros e índices morfométricos que permitam estudar o perigo de inundação das bacias. A partir do exposto, o objetivo do trabalho é identificar as variações da resposta hidrológica das bacias de interesse em função dos parâmetros e índices morfométricos obtidos de diferentes fontes de dados e escalas. Os resultados da análise multiescala evidenciam o peso dos processos de generalização cartográfica associados numa escala de mínimos detalhes. Em termos de análise da resposta hidrológica é possível inferir que o uso da escala 1:50.000 pode subestimar as chuvas torrenciais das bacias e, em consequência, o grau de perigo das mesmas.

Palavras-chave: Morfometria Fluvial; Inundações; Sauce Corto; Coronel Suarez.

Introducción

Para el estudio de la dinámica de cuencas hidrográficas no aforadas es fundamental el análisis morfométrico. A través del estudio de parámetros e índices morfométricos es posible interpretar la dinámica geomorfológica y la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica. El análisis permite comprender los elementos básicos y definir el grado de evolución de dicho sistema y por ende, el estado erosivo en el que se encuentra (Senciales González, 1999).

Existe una gran variedad de trabajos teórico-metodológicos clásicos sobre índices y parámetros morfométricos. Horton (1945) abordó los primeros modelos cuantitativos para estudiar la dinámica fluvial. Su trabajo fue retomado y a su vez modificado por autores tradicionales en la temática como Schumm (1956); Strahler (1964); Gregory y Walling (1973); Jardí (1985); Romero Díaz y López Bermúdez (1987); Senciales González (1999). A nivel internacional los índices morfométricos continúan siendo ampliamente aplicados al estudio del comportamiento hidrológico de cuencas: Chougale Sujit y Sapkale Jagdish (2017); Shankar y Dharanirajan (2018); Singh, Kanhaiya, Singh y Chaubey (2018); Ahmed, Ahmad Ali, Iqbal (2018); Basu y Pal (2019) y Asfaw y Workineh (2019), entre otros. En el continente americano, entre los trabajos en materia de análisis morfométrico cabe citar a Oré Cierro, Díaz Quintana, y Loarte Aliaga (2016); Ferreira Batista, Batista Cabral Pereira, Rocha y Rodrigues Barbosa (2017); Furlan de Souza, Pertille, Schramm Corrêa y Santos Vieira (2017); Ramírez Granados y Alfaro Jiménez (2018); Da Silva, Faria de Bessa, Fagundes, Schmitt y Souza Costa (2018); Silveira Cordeiro et al. (2019), entre otros. En el territorio nacional, las mayores aplicaciones en la temática se desarrollan en cuencas de montaña y serranas: Esper Angillieri y Perucca (2014); Esper Angillieri, Espejo, Lara, Perucca y Rothis (2016); Díaz Gómez, Gaspari y Georgief (2018) y Aumassanne et al., (2018). En el Sistema de Ventania, fueron realizados análisis morfométricos a partir de combinación de índices por Gil (2010) para la cuenca alta del río Sauce Grande, Gentili (2012) para la cuenca del arroyo Sauce Corto, Volonté (2017) para la cuenca del arroyo San Bernardo y Gil, Gentili, Campo, Jelinski y Crisafulli (2016) evaluaron la potencialidad para generar crecidas a partir de la combinación de índices morfométricos en las cuencas altas del río Sauce Grande y el arroyo Sauce Corto. Por otra parte, Gil, Gentili y Campo (2009) evaluaron la influencia de la litología, estructura y morfología en índices morfométricos para subcuencas del río Sauce Grande y el arroyo Sauce Corto.

En la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (vertiente norte del Sistema de Ventania), ocurren eventos de precipitaciones extremas que generan crecidas y dan lugar a inundaciones. Estos eventos provocan daños a las poblaciones de Santa María, Santa Trinidad, San José y Coronel Suárez, y afectan a las personas, al normal desarrollo de sus actividades y a las infraestructuras. La cuenca alta del arroyo Sauce Corto no es aforada y para un estudio del peligro de inundación es necesario el análisis de parámetros e índices morfométricos que permitan inferir su respuesta hidrológica.

Para el análisis morfométrico, el uso de determinadas escalas se encuentra en función de la superficie de la cuenca (Jardí, 1985). En cuencas con una superficie de 5.000 km² se suele utilizar mapas a escala de 1:50.000, a medida que la superficie disminuye la escala a utilizar debe ser mayor. Las subcuencas analizadas presentan superficies considerablemente menores a lo expuesto. La única fuente de datos altimétricos de cobertura continua en el Sistema de Ventania son las cartas topográficas a escala 1:50.000, insuficientes para un adecuado análisis de la morfometría fluvial de las cuencas bajo estudio. Por esta razón, resulta de utilidad la evaluación de parámetros e índices morfométricos a partir de productos de mayor escala. Por ello, el objetivo del trabajo es identificar las variaciones de la respuesta hidrológica de cuencas de interés en función de los parámetros e índices morfométricos obtenidos de distintas fuentes de datos y escalas.

Se seleccionaron de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto las subcuencas Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Lolén debido a que son las que poseen mayor potencialidad para generar crecidas, comportamiento asociado a la forma, configuración de la red de drenaje y gradientes de pendientes (Gentili, 2012). De esta forma, será posible evaluar los cambios en los valores obtenidos y cómo repercuten en la peligrosidad para generar crecidas según las diferentes escalas de trabajo. El conocimiento del comportamiento hidrológico de las cuencas ante la ocurrencia de eventos extremos de precipitación contribuye a valorar el peligro como dimensión del riesgo de inundación del área. Al mismo tiempo, se constituye como una herramienta para la gestión del riesgo de inundación. Resultados en esta línea se encuentran en concordancia con los objetivos 6, 11 y 13 de los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (United Nations General Assembly, 2015).

Área de estudio

Las cuencas Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Lolén forman parte de la cuenca alta del arroyo Sauce Corto, vertiente norte del Sistema de Ventania, ubicada al suroeste de la provincia de Buenos Aires.

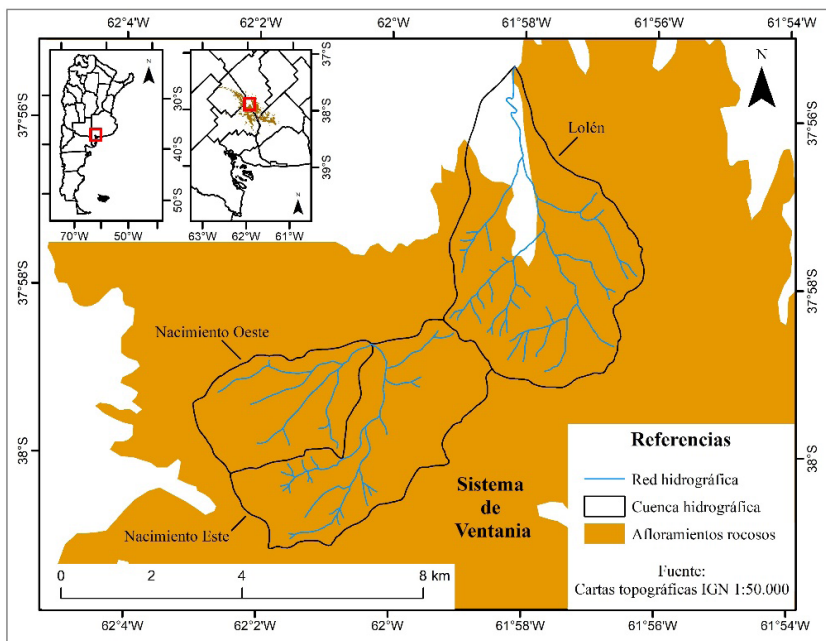
El suroeste bonaerense está comprendido en la faja planetaria de climas templados con veranos e inviernos bien marcados y primaveras y otoños moderados. Se presentan variaciones espaciales en las temperaturas y en las precipitaciones, con una estacionalidad térmica marcada. La temperatura media anual oscila entre 14 °C y 20 °C y las precipitaciones medias están comprendidas entre los 841,7 mm en Tres Arroyos y 380 mm en Viedma (Campo de Ferreras, Capelli de Steffens, y Diez, 2004). El sistema serrano actúa como una divisoria de aguas y produce una sobreexcitación orográfica de las precipitaciones del orden de los 110 mm (Casado, Gil, y Campo, 2007). La disposición de las laderas genera un cambio en la cantidad y en el comportamiento de las precipitaciones generando una gran variabilidad espacial de las precipitaciones dentro del valle interserrano (Gentili y Gil, 2013). Particularmente, en estaciones próximas al área de estudio, para el período 1961-2010, la precipitación media anual es de 753,3 mm en Coronel Suárez y de 803,5 mm en estancia El Pantanoso, ubicada en el área serrana. Con respecto, al comportamiento medio estacional, ambos sitios presentan máximos valores en verano y primavera (Gentili, 2012). En cuanto a los valores de precipitación máxima anual en 24 horas, en el área se registraron: 168 mm (octubre de 2003), 162 mm (octubre de 2003) y 130 mm (enero de 2011) en las estancias Sauce Corto, Cerro Áspero y El Pantanoso respectivamente.

Desde el punto de vista geológico predominan afloramientos rocosos, en donde los suelos presentan escaso desarrollo. No obstante, el sector inferior de las microcuencas de interés se encuentra cubierto de depósitos eólicos principalmente loésicos de diferentes eventos de depositación (Pereyra y Ferrer, 1995). Los arroyos antes mencionados, discurren sobre litologías del Devónico inferior correspondientes al grupo Ventana (formación Lolén, formación Providencia y formación Napostá). La primera de ellas compuesta de areniscas de granos finos a mediano, grises, verdosos, parduscos y amarillentos, la Fm. Providencia formada por ortocuarcitas rojizas a rosadas y la Fm. Napostá constituida por ortocuarcitas muy homogéneas de grano fino a muy fino, maciza y densas (Harrington, 1947). Desde el punto de vista geomorfológico, en la vertiente norte del Sistema de Ventania el proceso dominante de modelado tanto en el pasado como en la actualidad es el fluvial. La depositación y erosión eólica han jugado un importante papel en la configuración de la red fluvial, siendo uno de los factores de su diseño (Pereyra y Ferrer, 1995).

La vegetación original predominante del área es la estepa de gramíneas (Cabrera, 1976). En la actualidad, debido al uso intensivo del suelo, la vegetación autóctona descripta ha sido destruida o alterada casi en su to-

alidad. La agricultura y la ganadería se constituyen como las actividades económicas por excelencia.

Figura N° 1. Área de estudio



Fuente: Elaborado por los autores.

Materiales y métodos

Para el análisis morfométrico fluvial multiescalar se utilizaron dos escalas: 1:50.000 y 1:2.000 (aproximada) de distintas fuentes de datos. Para la escala 1:50.000 se emplearon las cartas topográficas Sierra de las Tunas, Estancia Gran Chaco, Tornquist y Sierra de la Ventana del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las tres primeras con equidistancia de 10 metros y la última de ellas de 25 metros. Para la escala de 1:2.000 se trabajó a partir de imágenes satelitales de Google Earth Pro®. El análisis se complementó con control de campo.

Se vectorizaron la red hidrográfica de ambas fuentes de datos y las curvas de nivel y los puntos acotados de las cartas topográficas. A partir de dichos datos se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) mediante el interpolador *Topo to Raster*, provisto por ArcGIS 10®. La fuente de datos cartográfica y el interpolador utilizados (corregidos con fines hidrológicos,

que permite incluir además de las curvas de nivel, líneas de drenaje, puntos acotados, depresiones y superficies cubiertas de agua) resultan los más apropiados en cuanto a precisión y representación del relieve del Sistema de Ventania (Casado, Gentili, Campo, y Peiry, 2010; Campo, Gentili, y Silva, 2016).

A partir de los datos descriptos se delimitaron las cuencas hidrográficas y se jerarquizaron las redes de drenaje según Strahler (1964). Luego se obtuvieron los parámetros de medición directa: área, perímetro pendiente media de la cuenca, longitud del cauce principal, cota máxima y cota mínima (Cuadro N° 1). Para la determinación del cauce principal de la red de drenaje se consideraron los criterios topográfico y de longitud propuestos por Senciales González (1999). Según el primero de ellos, el cauce principal es aquel cuya cabecera alcanza el punto más elevado y según el criterio de longitud, el cauce principal es aquel que se encuentra más alejado del nivel de base. Se seleccionaron estos criterios, 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.

Cuadro N° 1. Parámetros morfométricos

Parámetro	Unidad	Significado
Área	km ²	Área de la cuenca hidrográfica
Perímetro	km	Perímetro de la cuenca hidrográfica
Pendiente media de la cuenca	.	Pendiente media de la cuenca hidrográfica
Longitud del cauce principal	km	Longitud del cauce principal de la cuenca hidrográfica
Cota máxima	m	Cota del punto más alto de la cuenca hidrográfica
Cota mínima	m	Cota del punto más bajo de la cuenca hidrográfica

Fuente: Elaborado por los autores.

En relación con los índices morfométricos, se calcularon: Relación de Bifurcación (Rb), Relación de Longitud (Rl), Densidad de Drenaje (Dd) y Razón de Elongación (Re) (Cuadro 2). A partir del análisis conjunto de dichos índices, es posible inferir la respuesta hidrológica de cuencas no aforadas y mediante la comparación de los resultados de cada cuenca, valorar en términos relativos su peligrosidad asociada a la potencialidad para generar crecidas (Senciales González, 1999; Gil, 2010; Gentili, 2012, Gil et al., 2016). Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos de los parámetros e índices a ambas escalas se realizó una comparación cuali-cuantitativa para la identificación de las variaciones de los índices asociados al aumento de la escala.

Cuadro N° 2. Índices morfométricos

Índice	Fórmula	Significado
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"
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
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)
Razón de Elongación (Re)	$Re = \frac{1,129\sqrt{A}}{L_{max}}$	A = Área de la cuenca L_{max} = Longitud del cauce principal

Fuente: Elaborado por los autores.

Resultados y discusión

Jerarquización y tipología de las redes de drenaje

La jerarquización de los tramos de cauce permite tener un mejor conocimiento del desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El proceso de jerarquización es la base para la subdivisión de una cuenca hidrográfica en subcuencas, donde el orden de cada una de ellas es determinado por el orden jerárquico del cauce principal que drena a la misma. Estas subcuencas son las unidades de diagnóstico que posteriormente se utilizan para el análisis morfométrico.

Las cuencas Lolén y Nacimiento Oeste a ambas escalas de trabajo no presentan variaciones en cuanto al orden jerárquico de su red de drenaje. La cuenca Nacimiento Este, a escala 1:50.000 posee un orden jerárquico de 4 y a escala 1:2.000 un orden de 3 (Cuadro N° 3). Para esta cuenca, y en relación con el origen de dicha diferencia, podría descartarse la variación del número de cursos asociada a las modificaciones producto de las recurrentes actividades de labranza ya que la superficie bajo desarrollo agrícola es escasa respecto del total de la cuenca (en la que hay dominancia de afloramientos rocosos de la Fm. Napostá y Fm. Providencia). Es posible inferir que, las diferencias en la representación de la red hidrográfica o en el proceso de generación de curvas de nivel se vincule al proceso analógico de elaboración de los documentos cartográficos (son de ediciones de más de 40 años: Estancia Gran Chaco, 1957; Sierra de las Tunas, 1957; Sierra de la Ventana, 1972; Tornquist, 1977).

Cuadro N° 3. Frecuencia según orden y jerarquía de la red de hidrográfica

Cuenca	Escala 1:50.000				
	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Total
Lolén	31	7	2	1	41
Nacimiento Oeste	7	3	1		11
Nacimiento Este	23	7	2	1	33
Cuenca	Escala 1:2.000				
	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Total
Lolén	46	11	3	1	61
Nacimiento Oeste	13	4	1		18
Nacimiento Este	41	8	1		50

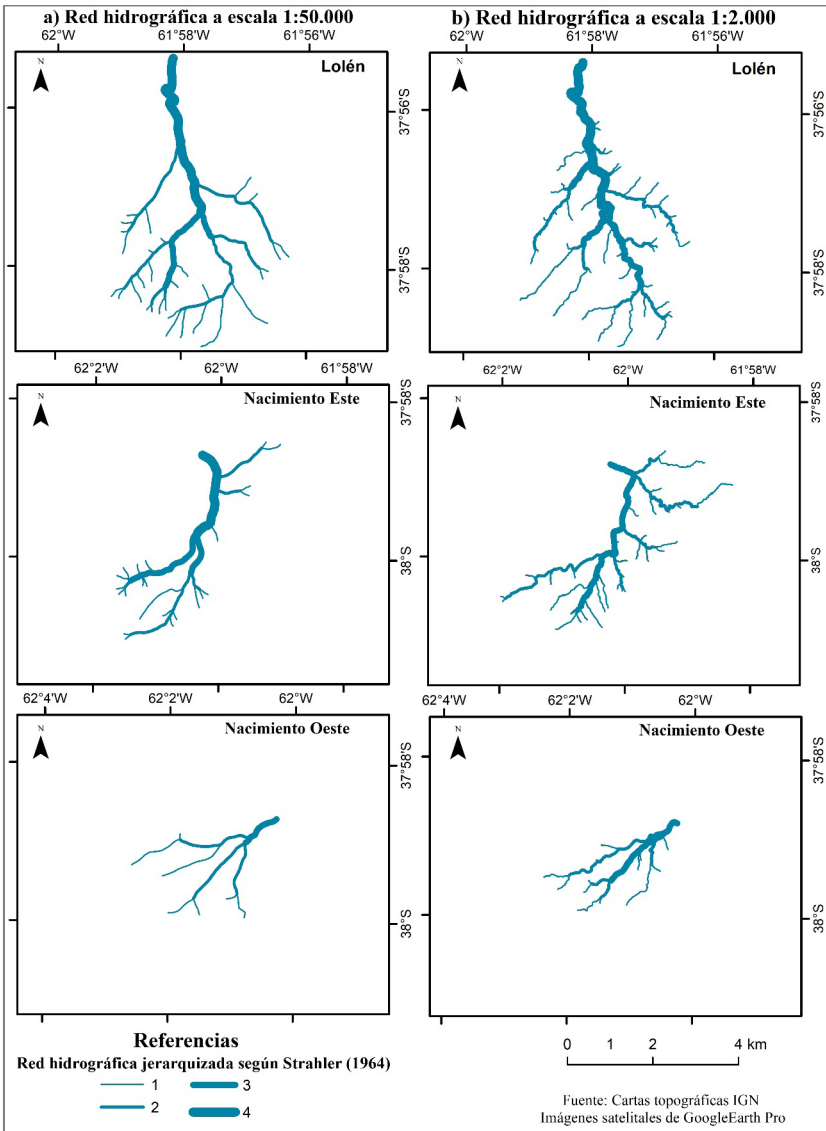
Fuente: Elaborado por los autores.

En las tres cuencas, las diferencias de jerarquización se inician en los tramos de cursos de orden 1 y se trasladan hacia los órdenes mayores. En relación con los tramos de cauce de orden 1, se observa que el cambio de escala implica un elevado crecimiento de su frecuencia. Se verificaron aumentos del 48 %, 85 % y 78 % para Lolén, Nacimiento Oeste y Nacimiento Este respectivamente. En las dos últimas cuencas, la diferencia es debida a que los cursos de orden 1 son de corta extensión y considerando el límite de error gráfico a escala 1:50.000, no es posible indicarlos. Los resultados del análisis multiescalar evidencian el peso de los procesos de generalización cartográfica asociados a la escala de semidetalle (1:50.000). En términos del análisis de la respuesta hidrológica es posible inferir que el uso de la escala (1:50.000) puede llevar a la subestimación de la torrencialidad de las cuencas y en consecuencia, del grado de peligrosidad de la cuenca.

El análisis de las tipologías de redes hidrográficas contribuye a la identificación de anomalías de drenaje. En términos generales, son el resultado de sistemas morfodinámicos diferentes, por causas litológicas, estructurales, climáticas o combinadas (Howard, 1967; Chorley, 1969; Gregory & Walling, 1973). Dado que, a lo largo de su evolución, las tres subcuencas han compartido las mismas condiciones climáticas, es posible atribuir la diferencia tipológica de sus redes de drenaje a la conjunción de causas litológicas y estructurales (Gentili, 2012).

La red de drenaje del arroyo Lolén es dendrítica (Fig. 2). Presenta uniformidad litológica en toda la cuenca: el río discurre mayormente sobre afloramientos de areniscas de granos finos a medianos - Fm- Lolén - (Ha-

Figura N° 2. Red hidrográfica de los arroyos Lolén, Nacimiento Este y Nacimiento Oeste a escala a) 1:50.000 y b) 1:2.000



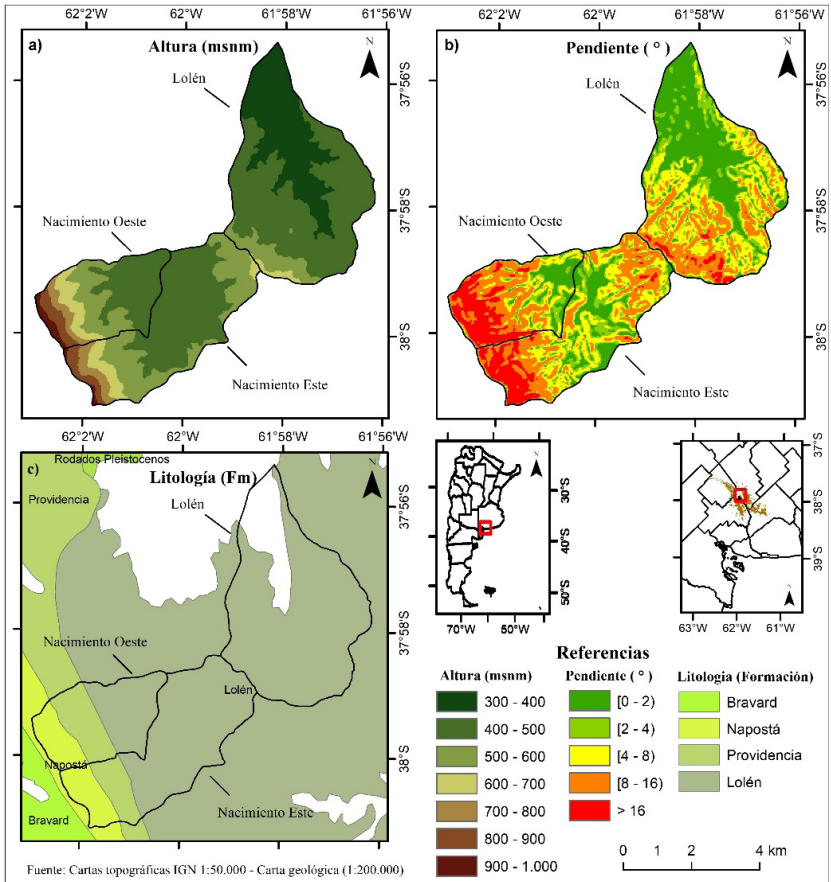
Fuente: Elaborado por los autores.

rrington, 1947) en pendientes suaves (Fig. 3). La red de drenaje de las cuencas Nacimiento Oeste y Nacimiento Este discurren sobre Formación Napostá y Providencia, lo cual es un factor condicionante de la tipología

de sus redes de drenaje y evolucionan en áreas de elevados gradientes (Fig. 3). Nacimiento Oeste presenta una tipología de tipo paralela (Fig. 2), con trazados rectilíneos (Senciales González, 1999). Nacimiento Este presenta una red subdendrítica (Fig. 2), con trazados angulosos que pueden atribuirse a contactos litológicos (Gentili, 2012).

La facilidad de identificación de la tipología de drenaje, desde un punto de vista cualitativo, no es uniforme respecto a la escala. Para la cuenca Lolén, la escala más representativa resultó ser la de mayor detalle mientras que en las restantes cuencas la escala 1:50.000 fue la más adecuada ya que las generalizaciones asociadas a la misma permiten esquematizar la tipología.

Figura N° 3. Mapas: a) altimétrico, b) de gradiente de pendientes y c) litológico



Fuente: Elaborado por los autores.

Morfometría Fluvial

Los parámetros morfométricos se adquieren de la medición directa de las cartas topográficas base. El área de una cuenca es un parámetro de gran interés debido a que de él se derivan índices morfométricos de relevancia para determinar el estado erosivo de las cuencas y establecer una clasificación en cuanto a su tamaño (Jardí, 1985; Chow, Maidment, y Mays, 1994). El tamaño de la cuenca tendrá incidencia en el volumen de agua recibida y en la consecuente generación de procesos erosivos y de crecidas (Bruniard, 1992). La cuenca Lolén es la de mayor superficie con 18,95 km² (Cuadro N° 4). Cabe destacar que para el cálculo del área de las cuencas, la superficie fue tomada de la delimitación de las cuencas a escala 1:50.000. El perímetro de una cuenca está vinculado con el área ya que es directamente proporcional (Jardí, 1985) y de él se derivan otros índices (Cuadro N° 4).

Cuadro N° 4. Parámetros morfométricos

Cuenca/ Parámetro	Área (km ²)	Perímetro (km)	Pendiente media de la cuenca (°)	Cota max. (msnm)	Cota min. (msnm)	Long. del cauce principal (km)	
						Escala 1:50.000	Escala 1:2.000
Lolén	18,95	18,84	5,83	625	349	8,04	8,73
Nacimiento Oeste	7,53	11,77	11,83	950	406	3,85	3,91
Nacimiento Este	12,75	18,4	8,85	966	406	5,53	6,16

Fuente: Elaborado por los autores.

La pendiente media es de importancia ya que incide en la velocidad del caudal, condiciona la energía cinética y la consecuente erosividad a lo largo del cauce (Senciales González, 1999). Para definir los rangos de pendiente de las cuencas se utilizó la clasificación propuesta por Van Zuidam (1985) acotada a 5 clases de acuerdo a las características del sector de estudio (Fig. 3). Las cotas máximas y mínimas son parámetros utilizados para el cálculo del desnivel. Nacimiento Oeste y Este poseen una pendiente media de 11,83 ° y 8,85 ° respectivamente (moderadamente escarpada). Ambas presentan cota máxima similar e igual cota mínima (confluyen en el mismo punto) (Cuadro N° 4). Lolén presenta una pendiente media de 5,85 ° (*sloping*) con un desnivel considerablemente menor que las cuencas anteriores (276 m).

Las diferencias de desnivel entre las cuencas y la complejidad topográfica del área configuran una peligrosidad diferente en cada una de ellas. Para las cuencas Nacimiento Oeste y Nacimiento Este, la elevada frecuen-

cia de fuertes gradientes de pendiente (clases 4 y 5 de Fig. 3 b) contribuye a la activación de procesos erosivos como consecuencia del poder de arrastre de la escorrentía y una mayor potencialidad de generar crecidas.

La longitud del cauce principal incide en el comportamiento hídrico de las cuencas. Una extensa longitud del cauce principal implica una concentración paulatina a lo largo del colector por lo que la energía de la crecida se disipa rápidamente, por el contrario una reducida longitud producirá menor retardo y por ende, mayor energía concentrada (Senciales González, 1999).

Para Nacimiento Oeste y Nacimiento Este en ambas escalas el curso principal coincide siguiendo el criterio de longitud y el criterio topográfico, es decir que el cauce principal definido es aquel que posee mayor longitud y cuya cabecera alcanza la máxima altura (Cuadro N° 5; Fig. 4). Por el contrario, para la cuenca del arroyo Lolén a escala 1:50.000 no hubo coincidencia en los criterios seleccionados para la identificación del cauce principal. En términos cualitativos, Lolén y Nacimiento Oeste presentan similitud en la sucesión de tramos que conforman el curso principal, situación que no se verifica para Nacimiento Este (puede atribuirse a los cambios observados en la configuración de la red de drenaje y consecuentemente en su jerarquización) (Cuadro N° 3; Fig. 2). En términos cuantitativos, las diferencias de longitud del cauce principal no son grandes entre ambas escalas, siendo siempre mayores los cauces a escala 1:2.000: Lolén (0,69 km), Nacimiento Oeste (0,06 km) y Nacimiento Este (0,63 km).

Las mayores diferencias se obtienen en las cuencas donde el curso principal discurre mayormente por zonas de baja pendiente, asociado esto a la minimización del error por subestimación de la longitud de cauces en sectores de fuerte desnivel. En este sentido, Senciales González (1999) afirma que solo en aquellas pendientes inferiores al 20 % se reconoce dicho error como de menor importancia.

Cuadro N° 5. Criterio de selección de cauce principal

Cuenca	Criterio	
	1: 50.000	1:2.000
Lolén	Topográfico	Longitud - Topográfico
Nacimiento Oeste	Longitud - Topográfico	Longitud - Topográfico
Nacimiento Este	Longitud - Topográfico	Longitud - Topográfico

Fuente: Elaborado por los autores.

Se denomina Relación de bifurcación (R_b) a la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato

superior (Strahler, 1964). En cuanto a los resultados obtenidos para este índice, valores próximos a 2 revelan áreas de escaso relieve, valores típicos de entre 3 y 5 para los sistemas fluviales (en cuencas donde la estructura geológica no distorsiona el patrón de drenaje natural) y valores superiores a 5 y sobre todo a 10 indican una fuerte dependencia estructural (Strahler, 1964; Senciales González, 1999).

A escala 1:50.000, la relación de bifurcación (Rb) media para las cuencas presentan valores cercanos a 3 (Cuadro N° 6), típicos de los sistemas fluviales. Para la escala 1:2.000, los valores medios de Rb son levemente mayores en las cuencas Lolén y Nacimiento Oeste, manteniéndose en el rango típico de los sistemas fluviales. Por el contrario, Nacimiento Este presenta un valor de Rb medio muy superior respecto de la escala menor. En esta línea, Strahler (1964) indica que Rb superiores a 4 indican una torrencialidad alta. El elevado valor de Nacimiento Este permite inferir una rápida concentración de las aguas en los cursos y por ende, crecidas súbitas potenciadas por los elevados gradientes de las pendientes. Lo indicado refuerza lo observado por Gentili (2012) y Gil et al. (2016) para esta cuenca.

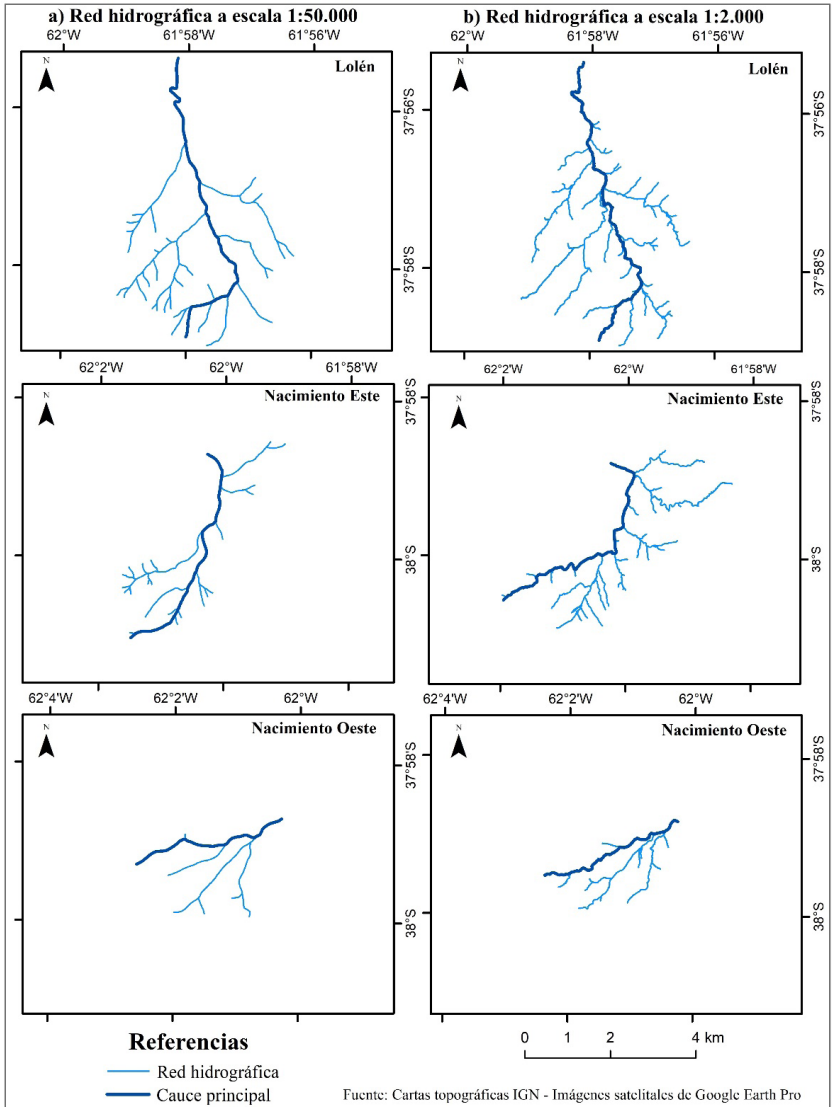
Cuadro N° 6. Relación de bifurcación y Relación de longitud

Cuenca	Escala 1:50.000		Escala 1:2.000	
	Rb media	RI media	Rb media	RI media
Lolén	3,31	0,86	3,92	0,58
Nacimiento Oeste	2,67	0,57	3,62	0,6
Nacimiento Este	2,93	0,67	6,56	0,57

Fuente: Elaborado por los autores.

La razón de longitud (RI) se define como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior (Strahler, 1964). Los valores medios que suelen obtenerse oscilan entre 1,5 y 3. Los menores valores corresponden a cuencas en las que se produce un leve incremento de la longitud de los cauces y los mayores para aquellas cuencas en las cuales sus órdenes superiores poseen grandes longitudes (Senciales González, 1999). Los valores medios para las tres cuencas (Cuadro N° 6) son inferiores a 1,5, indicando leve incremento de la longitud de los cauces entre ordenes sucesivos y mayor energía concentrada en los cauces principales (Sala y Gay, 1981). Esto último se refuerza con los valores obtenidos en la escala mayor.

Figura N° 4. Curso principal de los arroyos Lolén, Nacimiento Este y Nacimiento Oeste a escala a) 1:50.000 y b) 1:2.000



Fuente: Elaborado por los autores.

La densidad de drenaje (Dd) se define como el cociente de la longitud total de las redes de drenaje de una cuenca y el área de la misma (Horton, 1945). Los valores obtenidos a ambas escalas de trabajo son inferiores a 10

(Cuadro N° 7), indicando baja densidad de drenaje y textura gruesa (Strahler, 1964), lo que es indicio de materiales duros y resistentes (Strahler, 1974). Para la escala 1:2.000, los valores del parámetro son mayores respecto a los de la escala 1:50.000. Nuevamente se refleja la incidencia de la escala en la longitud de los tramos de cauce. El incremento del índice con la escala indica una fuerte incidencia de la escorrentía concentrada y refuerza la inferencia de crecidas bruscas realizada por Gentili (2012).

Cuadro N° 7. Densidad de drenaje y Relación de Elongación

Cuenca	Escala 1:50.000		Escala 1:2.000	
	Dd (km/km ²)	Razón de Elongación	Dd (km/km ²)	Razón de Elongación
Lolén	1,73	0,6	2,04	0,56
Nacimiento Oeste	1,44	0,8	1,66	0,79
Nacimiento Este	1,36	0,73	2,1	0,65

Fuente: Elaborado por los autores.

La Razón de elongación (Re) es la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área que la de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma. Valores inferiores a 1 indican cuencas con una forma más alargada, mientras que valores cercanos a dicho valor, se obtienen para cuencas que se asemejan a una forma circular (Schumm, 1956). El análisis multiescalar permite observar que los valores del índice decrecen levemente con el aumento de la longitud de los tramos de cauce a escala 1:2.000. Nacimiento Oeste mantiene su forma con tendencia a la circularidad, por lo que existe menor retardo entre el momento que sucede el evento de precipitación y el de crecida y por lo tanto, la peligrosidad es mayor (Jardí, 1985). Mientras que Lolén y Nacimiento Este acrecientan su tendencia a ser cuencas elongadas respecto de la anterior.

Conclusiones

El aumento de la escala y el uso de una imagen como fuente de datos permitió representar de forma más precisa los tramos de las redes de drenaje y en consecuencia, aproximarse más a sus dimensiones reales.

En relación con la jerarquización de la red de drenaje se registraron aumentos considerables de tramos de cauce, principalmente de orden 1. Esto permitió inferir que a la escala de 1:50.000 se subestiman en gran medida la torrencialidad de las cuencas. Respecto de la tipología de la red de drenaje, su facilidad de identificación no es uniforme respecto a la escala. A ambas escalas de trabajo, tanto en Lolén como en Nacimiento Oeste, hay

una gran coincidencia en los tramos del cauce principal. Sin embargo para Nacimiento Este ocurre lo contrario, esto refleja que al cambio de escala dicha cuenca posee un orden de cauce diferente. Esta situación puede atribuirse a errores en la fuente de datos.

En términos cuantitativos, quedó reflejado en los cuatro índices calculados que el aumento de la escala de trabajo, contribuye a la subestimación de la respuesta hidrológica. En relación con la respuesta hidrológica de las cuencas, los resultados no solo confirmaron los estudios previos, sino que permitieron inferir que la potencialidad para generar crecidas e inundaciones es mayor.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, M., Ahmad Ali, S., y Ikbal, J. (2018). Evaluation of Drainage Morphometry of Debari Sector, Udaipur District, Rajasthan, Northwest India using Satellite Data under GIS Environment. *Cloud Publications International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 7(1), 2746–2757. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.370>
- Asfaw, D., y Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*. <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. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6632148>
- Basu, T., y Pal, S. (2019). RS-GIS based morphometrical and geological multi-criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 63(3), 1253–1269. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2018.10.033>
- Bruniard, E. (1992). *Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. San Isidro: CEYNE.
- Cabrera, M. (1976). Regiones fitogeográficas de la República Argentina. In W. . Kugler (Ed.), *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (2nd ed., pp. 1–85). Buenos Aires: ACME SACI.
- Campo, A. M., Gentili, J., y Silva, A. (2016). Comparación de DEM generados a partir de distintas fuentes de datos. Cuenca del arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania, Argentina. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 8(8), 34–55. Retrieved from <http://www.gesig-proeg.com.ar>
- Campo de Ferreras, A., Capelli de Steffens, A., y Diez, P. (2004). *El clima del suroeste bonaerense*. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo.
- Casado, A., Gentili, J., Campo, A., y Peiry, J.L. (2010). Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. In *Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino* (pp. 102–116). Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo.
- Casado, A. L., Gil, V., y Campo, A. M. (2007). Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario, Buenos Aires, Argentina. *Huellas*, (11), 9–26. Retrieved from <http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/huellas/n11a02casado.pdf>
- Chorley, R. (1969). The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. In R. . Chorley (Ed.), *Water, Earth and Man: A Synthesis of Hydrology, Geomorphology and Socio-Economic Geography* (pp. 77–99). Londres, Gran Bretaña: Methuen.

- Chougale Sujit, S., & Sapkale Jagdish, B. (2017). Morphometric Investigation of Morna River Basin, Maharashtra, India using Geospatial Techniques. *Disaster Advances*, 10(8), 31–38.
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Da Silva, J. S., Faria de Bessa, N. G., Fagundes, F., Schmitt, E., y Souza Costa, B. S. (2018). Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio como instrumento de apoio à gestão de recursos hídricos. *Revista Cereus*, 10(4), 284–297. Retrieved from <http://ojs.unirg.edu.br/index.php/1/article/view/2044>
- Díaz Gómez, A. R., Gaspari, F. J., y Georgieff, S. M. (2018). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta Geológica Lilloana*. Retrieved from <http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/67092>
- Esper Angillieri, M. Y., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L. P., y Rothis, 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.
- Esper Angillieri, M. Y., 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. Retrieved from <https://www.re-dalyc.org/html/943/94331762002/>
- Ferreira Batista, D., Batista Pereira Cabral, J., Rocha, T., y Rodrigues Barbosa, G. (2017). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio-Go. *Revista Eletrônica Do Curso de Geografia*, (29), 15–35. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i29.50602>
- Furlan de Souza, C., Pertille, C. T., Schramm Corrêa, B. J., y Santos Vieira, F. (2017). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Ivaí - Paraná. *Revista Eletrônica Do Curso de Geografia*, (29), 93–110. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i29.50602>
- Gentili, J. O. (2012). *Hidrografía del Arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de las inundaciones y anegamientos*. (Tesis Doctoral) Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.
- Gentili, J. O., y Gil, V. (2013). Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 22(1–2), 147–166.
- Gil, V. (2010). *Hidromorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas* (Tesis Doctoral) Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.
- Gil, V., Gentili, J., y 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.
- Gil, V., Gentili, J. O., Campo, A. M., Jelinski, G., y Crisafulli, M. (2016). Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires. In *Tercer Encuentro de Investigaciones en Formación de Recursos Hídricos*. Ezeiza, Buenos Aires: Instituto Nacional del Agua. Retrieved from https://www.ina.gov.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH_2016_paper_133.pdf
- Gregory, K., y Walling, D. (1973). *Drainage basin. Form and process: a geomorphological approach*. (E. Arnold, Ed.). London.
- 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.
- Horton, R. (1945). Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphologie. *Geological, Society of America*, (56), 275–370.
- Howard, A. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a simulation. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, (51), 2246–2259.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, XIX, 41–68. Retrieved from <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/download/45789/56812>
- Oré Cierro, E. L., Díaz Quintana, E., y Loarte Aliaga, C. W. (2016). Parámetros morfométricos de las microcuencas del Parque Nacional Tingo María, distrito Mariano Damaso Beraun-Huánuco. *Investigación y Amazonía*, 6(2), 39–54. Retrieved from <http://>

- revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/viewFile/101/85
- Pereyra, F., y Ferrer, J. (1995). Geomorfología del flanco nororiental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. In *IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses* (pp. 239–247). Junin: Universidad Nacional de la Plata.
- Ramírez Granados, P., y Alfaro Jiménez, K. (2018). Morfometría de la subcuenca del río Toyogres, Cartago, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 255–275. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451755917010>
- Romero Díaz, M. A., y López Bermúdez, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía Física*, (12), 47–62. Retrieved from <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42391>
- Sala, M., y Gay, R. (1981). Algunos datos morfológicos 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 Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Senciales González, J. (1999). *Redes fluviales. Metodología de análisis*. España: Universidad de Malaga.
- Shankar, S., & Dharanirajan. (2018). A study on the drainage morphometry of the strategic Kalpong river watershed, North Andaman, India Using Geographic Information System. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 47(01), 185–192. Retrieved from http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/43439/1/IJMS_47%281%29_185-192.pdf
- Silveira Cordeiro, T., De Abreu, H. A., Da Silva, P. R., Muller, R. F. M., Alvarenga, D. F., Barbosa Portilho, y D., Cordeiro, J. L. (2019). Análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Candidópolis, Itabira (MG). *Research, Society and Development*, 8(1). <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i1.529>
- Singh, S., Kanhaiya, S., Singh, A., & Chaubey, K. (2018). Drainage network characteristics of the Ghaghghar River Basin (GRB), Son Valley, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1525670>
- Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In V. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology compendium of water-resources technology* (pp. 39–76). New York: McGraw-Hill.
- Strahler, A. (1974). *Geografía Física*. Barcelona: Omega S.A.
- United Nations General Assembly. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- Van Zuidam, R. (1985). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Holanda: Smits, The Hague.
- Volonté, A. (2017). *Geomorfología Fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina*. (Tesis Doctoral) Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.