



Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Morfometría aplicada al peligro de crecidas en la cuenca del río Los Sarmientos, La Rioja, Argentina

Morphometry applied to flood hazards in the Los Sarmientos river basin, La Rioja, Argentina

Oscar JUAREZ^{1,2*}, María Cecilia CORBAT^{2,3}, Enrique FUCKS³, Adriana E. NIZ⁴

¹ Instituto de Ambientes de Montañas y Regiones Áridas (IAMRA), Universidad Nacional de Chilecito, Julián Amatte 22, Chilecito, La Rioja, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³ Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, calle 64, N° 3, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Posgrado Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicada (FTyCA), Universidad Nacional de Catamarca (UNCA), Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Regional La Rioja, Consultora Geoambiental (ConsultGeo).

* Autor de correspondencia: <ojuarez@undec.edu.ar>, <oscarjuarez705@gmail.com>

Resumen

La cuenca del río Los Sarmientos presenta características morfométricas que favorecen crecidas torrenciales durante la temporada estival, con antecedentes de eventos extraordinarios que han afectado a las poblaciones locales. El objetivo del trabajo es contribuir a determinar los posibles peligros de crecientes en la cuenca del río Los Sarmientos, ubicada en el departamento Chilecito (La Rioja, Argentina), mediante el análisis de la dinámica de la cuenca a través de los parámetros e índices morfométricos. En el entorno de un Sistema de Información Geográfica (QGIS), y en una base de datos cuantitativa se calcularon parámetros e índices relacionados con: forma de la cuenca, relieve, red de drenaje e intensidad del drenaje concentrado. Los resultados indican que la cuenca es de forma alargada y presenta un gran desnivel altitudinal. El comportamiento hidrológico de la cuenca tiene dependencia litológica, topográfica, estructural y morfológica. En la cuenca alta el flujo discurre erosionando el sustrato rocoso en busca del perfil de equilibrio y en la

► Ref. bibliográfica: Juárez, O.; Corbat, M. C.; Fucks, E.; Niz, A. E. 2025. "Morfometría aplicada al peligro de crecidas en la cuenca del río Los Sarmientos, La Rioja, Argentina". *Acta Geológica Lilloana* 36 (1): 29-50. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/1984>

► Recibido: 29 de julio 2024 – Aceptado: 18 de diciembre 2024

► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.



cuenca media / baja discurre por depósitos aluviales, siendo la zona de acumulación de sedimentos, por lo cual la peligrosidad podría incrementarse en la ciudad de Chilecito como consecuencia de los procesos de avulsión o elevación de lecho. También la disponibilidad de sedimentos ante un evento extraordinario aumenta la carga sólida, aumentando la peligrosidad. A su vez, depende de otros factores como la intensidad y duración de la tormenta, la existencia de lluvias previas reduce la infiltración, favoreciendo una rápida descarga y volviéndola potencialmente peligrosa ante eventos de crecidas extraordinarias.

Palabras clave: Chilecito, torrencial, semiárido, Sistemas de Información Geográficos, peligrosidad.

Abstract

The Río Los Sarmientos basin exhibits morphometric characteristics that promote torrential floods during the summer season, with a history of extraordinary events that have impacted local populations. The aim of this study is to help determine potential flood hazards in the Río Los Sarmientos basin, located in the Chilecito department (La Rioja, Argentina), through the analysis of basin dynamics using morphometric parameters and indices. Within a Geographic Information System (QGIS) environment and a quantitative database, parameters and indices related to basin shape, relief, drainage network, and concentrated drainage intensity were calculated. The results indicate that the basin has an elongated shape and a significant altitudinal gradient. The hydrological behaviour of the basin depends on lithological, topographic, structural, and morphological factors. In the upper basin, the flow erodes the rocky substrate in search of an equilibrium profile, while in the middle and lower basin, it flows through alluvial deposits, serving as a sediment accumulation zone. Consequently, the hazard level could increase in the city of Chilecito due to avulsion processes or bed elevation. Also, the availability of sediments prior to an extraordinary event increases the solid load, raising hazard levels. Additionally, other factors play a role, such as the intensity and duration of the storm; previous rainfall reduces infiltration, facilitating rapid discharge and making it potentially dangerous during extraordinary flood events.

Keywords: Chilecito, torrential, semi-arid, Geographic Information Systems, flood hazard.

INTRODUCCIÓN

El estudio morfométrico de una cuenca es de gran importancia para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como para inferir indirectamente la velocidad con la que van a escurrir las aguas sobre la superficie y, por lo tanto, la rapidez de respuesta (capacidad de almacenaje y/o tiempos de concentración para el escurrimiento) de la cuenca ante las precipitaciones. El comportamiento de la cuenca ante la presencia de lluvias extraordinarias puede verse condicionado por sus características morfométricas, como son el tamaño, la forma y la pendiente, que resultan muy importantes en la respuesta al escurrimiento y que pueden operar tanto para atenuar como para intensificar las avenidas. La mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen de flujo y la velocidad de su movimiento (Senciales González, 1999; Díez Herrero *et al.*, 2008). Conocer las propiedades morfométricas de las cuencas hidrográficas proporciona una descripción física espacial y al mismo tiempo, permite obtener conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales. Por otra parte, algunos parámetros (área, perímetro, desnivel altitudinal, alturas máxima, mínima, media, entre otros) son requeridos como datos de entrada en la mayoría de los modelos hidrológicos para el análisis de las características morfológicas y funcionales, para un potencial ordenamiento territorial (Ibisate González de Matauco, 2004).

En la cuenca del río Los Sarmientos (CRLS), también denominada río del Oro, son frecuentes, en épocas estivales, las crecidas provocadas por eventos de lluvias intensas, en cortos periodos de tiempo. Estas crecidas son de tipo avenidas (*flash flood*), representadas por un flujo de alta energía y repentino que en la mayoría de los casos es consecuencia de precipitaciones extraordinarias y que crecen en magnitud cuando el índice de infiltración del terreno es reducido por lluvias previas (NWS/NOAA, 2013). Estas crecidas, pueden afectar a las poblaciones situadas en los márgenes de los cursos fluviales, como así también a obras de ingeniería. A su vez, existe un crecimiento poblacional de la ciudad de Chilecito sin ordenamiento (Fig. 1), ocupando terrenos potenciales de ser afectados por las crecidas ordinarias (Figs. 1By 2A), incrementándose su riesgo ante eventos extraordinarios, como el del 31 de diciembre de 1998, que dejó sin agua potable a gran parte de la Ciudad (Fig. 2B). La CRLS no presenta información hidrometeorológica continua y disponible que permita realizar un análisis integrado de las crecidas, por lo cual toma importancia el análisis morfométrico, apoyado en la geomorfología e integrado en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

Por lo expuesto, el trabajo pretende contribuir a determinar los posibles peligros de crecida en la CRLS mediante el análisis del comportamiento dinámico de la cuenca expresado mediante el cálculo y uso de índices y parámetros morfométricos.

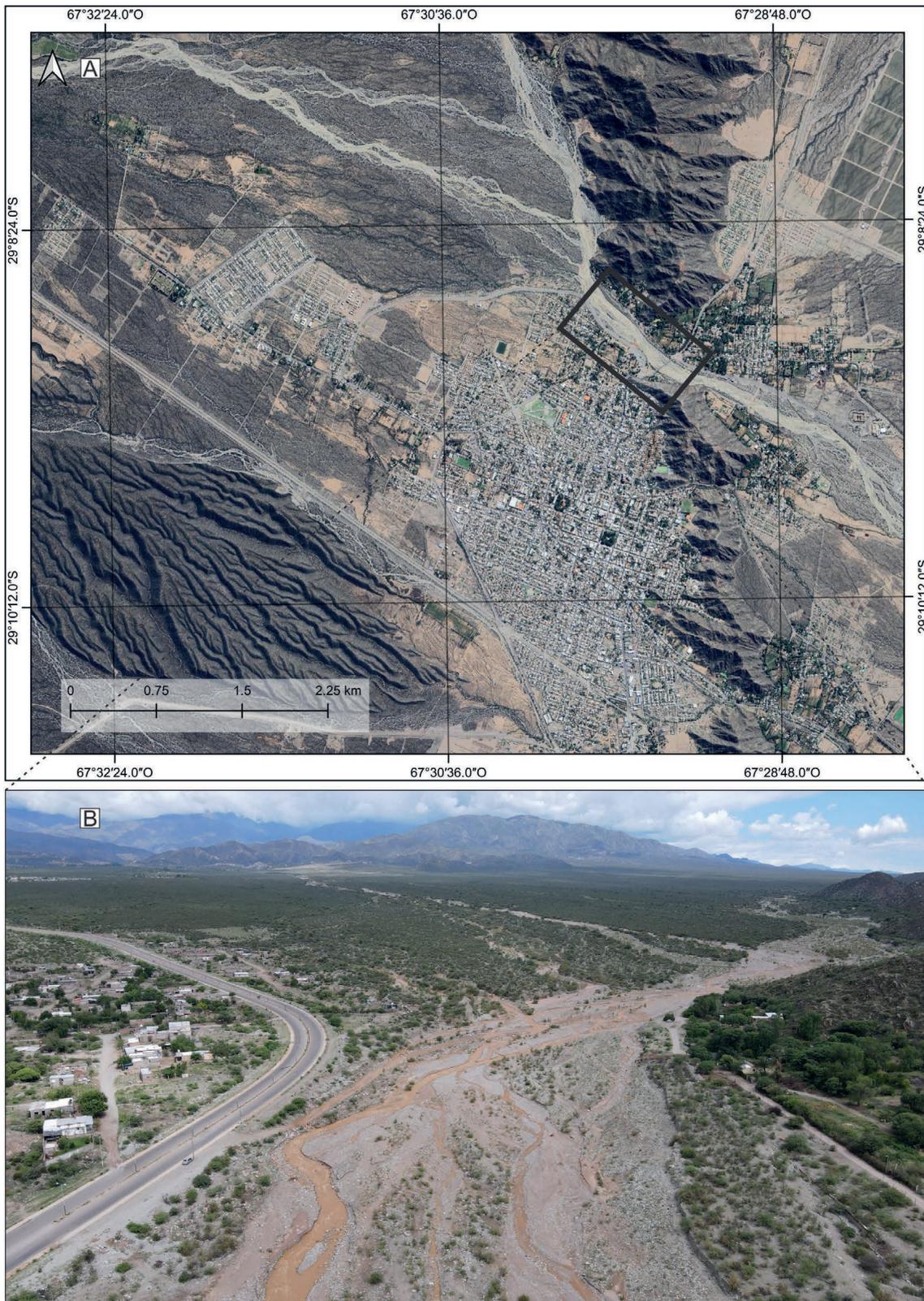


Figura 1. A) Imagen satelital de la ciudad de Chilecito, en donde se puede ver la relación de la ciudad con el río Los Sarmientos. B) Fotografía aérea, con vistas al oeste, que muestra en detalle las infraestructuras presentes en una zona del río Los Sarmientos y en donde se puede apreciar, zonas urbanas en ambas márgenes y un conjunto de casas dentro de la llanura de inundación.



Figura 2. A) Fotografía de la crecida ordinaria del río Los Sarmientos, del día 8 de enero del 2023. B) Imagen de la crecida extraordinaria del río Los Sarmientos, del día 31 de diciembre del 1998 (Diario El Independiente, 3 de enero del 1999).

ÁREA DE ESTUDIO

La CRLS se encuentra en el departamento Chilecito de la provincia de La Rioja, en el noroeste de la República Argentina (Fig. 3). El principal centro urbano de este departamento es la ciudad de Chilecito, que posee una población total de 58.798 habitantes para todo el departamento (INDEC, 2022).

La cuenca se desarrolla entre los $28^{\circ}57'/29^{\circ}10'$ de latitud Sur y los $67^{\circ}29'/67^{\circ}50'$ de longitud Oeste, con sus cabeceras en la Sierra de Famatina y desembocadura en el sector más bajo de la Cuenca Antinaco-Los Colorados (CALC) (Sosic, 1971) representado por los bajos de Santa Elena. La CALC se sitúa entre dos cadenas montañosas paralelas con dirección predominante norte – sur, la Sierra de Velasco (4.100 msnm) al este y la Sierra de Famatina (6.097 msnm) al oeste (Fig. 3).

La provincia de La Rioja pertenece a la diagonal árida de América del Sur, caracterizada por un clima que ha sido calificado como templado y árido, con veranos muy prologados y un déficit hídrico permanente. El clima árido-semiárido de la región presenta precipitaciones de alrededor de los 200 mm anuales. Durante el verano y comienzos de otoño, las masas de aire provenientes del Atlántico son las causantes de las precipitaciones (Bianchi *et al.*, 2005), que se concentran especialmente durante los meses de enero y febrero. Estas masas de aire ingresan a la región por el norte atravesando numerosos sistemas montañosos, con lo cual van perdiendo paulatinamente su humedad. En el invierno se dificulta la entrada de la masa de aire atlántica y predominan las masas de aire polares, con nevadas en forma discontinua.

Desde la perspectiva climática la región se caracteriza por una marcada continentalidad, una débil humedad, una fuerte insolación diaria, limpieza atmosférica, y una fuerte evaporación, así como por vientos cálidos y secos. Localmente, y si bien los diversos sistemas montañosos producen

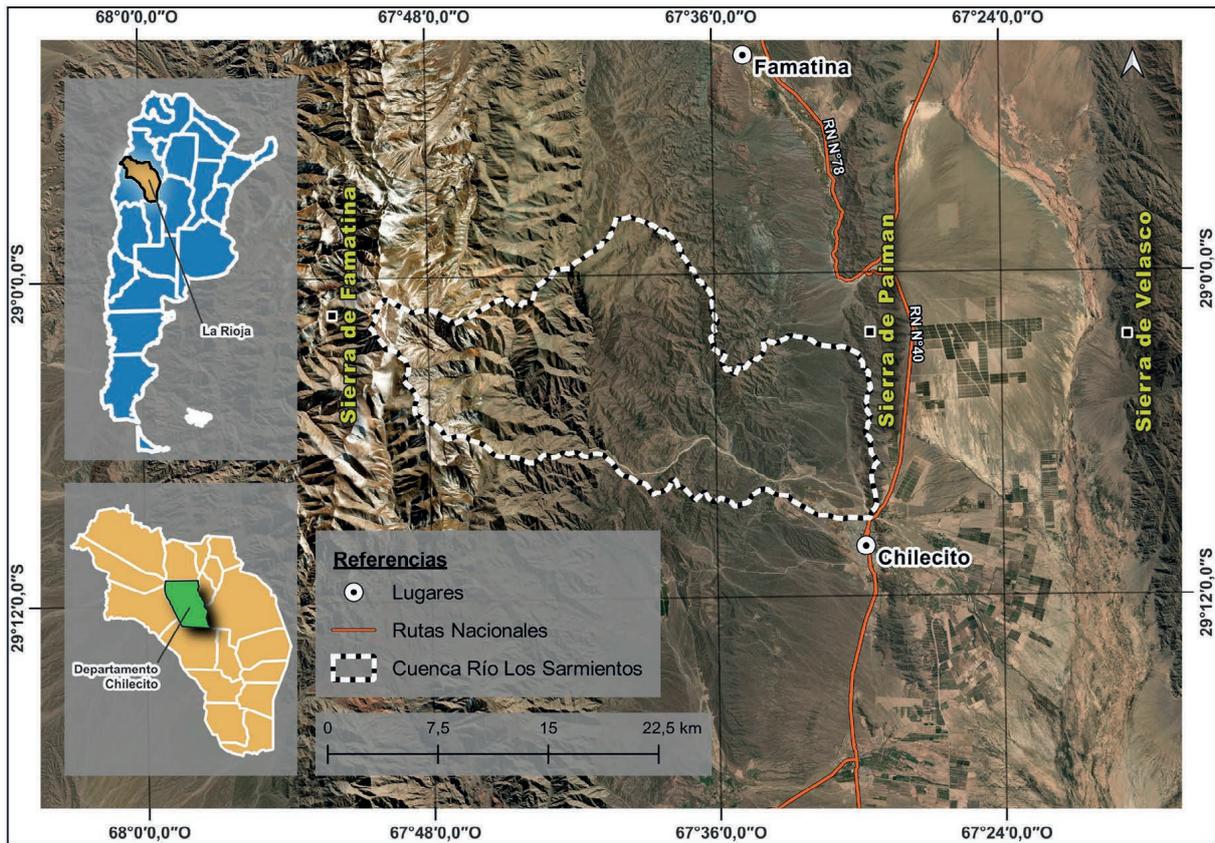


Figura 3. Mapa de ubicación de la CRLS.

cambios importantes en las condiciones climáticas de la región, según la clasificación de Köppen (Peel *et al.*, 2007) le corresponde un clima BWh es decir un clima árido con concentraciones estivales de las precipitaciones menores a 250 mm/año. En esta región entre los meses de enero y febrero las precipitaciones (lluvias estacionales) son de corta duración, pero de carácter torrencial, siendo las responsables de generación de posibles flujos con gran capacidad de carga de sedimentos.

La geología de la zona de estudio tiene como basamento a las rocas metamórficas de las formaciones Negro Peinado (Turner, 1960) y Achavil (Collo *et al.*, 2006), ambas de edad cámbrica (Fig. 4). Luego continúa el magmatismo calcoalcalino de edad ordovícica media (468 ± 3 y 481 ± 4 Ma; Rapela *et al.*, 2001), que aparece representado por los complejos magmáticos Paimán, Cerro Toro y Ñuñorco; la intrusión de los leucogranitos del plutón Loma Colorada (Alasino *et al.*, 2012; Dahlquist *et al.*, 2013), de edad devónica – carbonífera, asociada a la tectónica extensional. Suprayacen depósitos sinorogénicos neógenos, representados por areniscas y conglomerados de la Formación El Durazno (Dávila y Astini, 2003), y actividad magmática del Cenozoico representada por la Formación Mogotes. Dicha unidad constituye un conjunto de domos dacítico-andesíticos portadores de pirita, sulfuros de cobre y oro, de edad miocena superior-pliocena inferior ($5,0 \pm 0,3$ Ma) que presenta un proceso hidrotermal relacionado con el

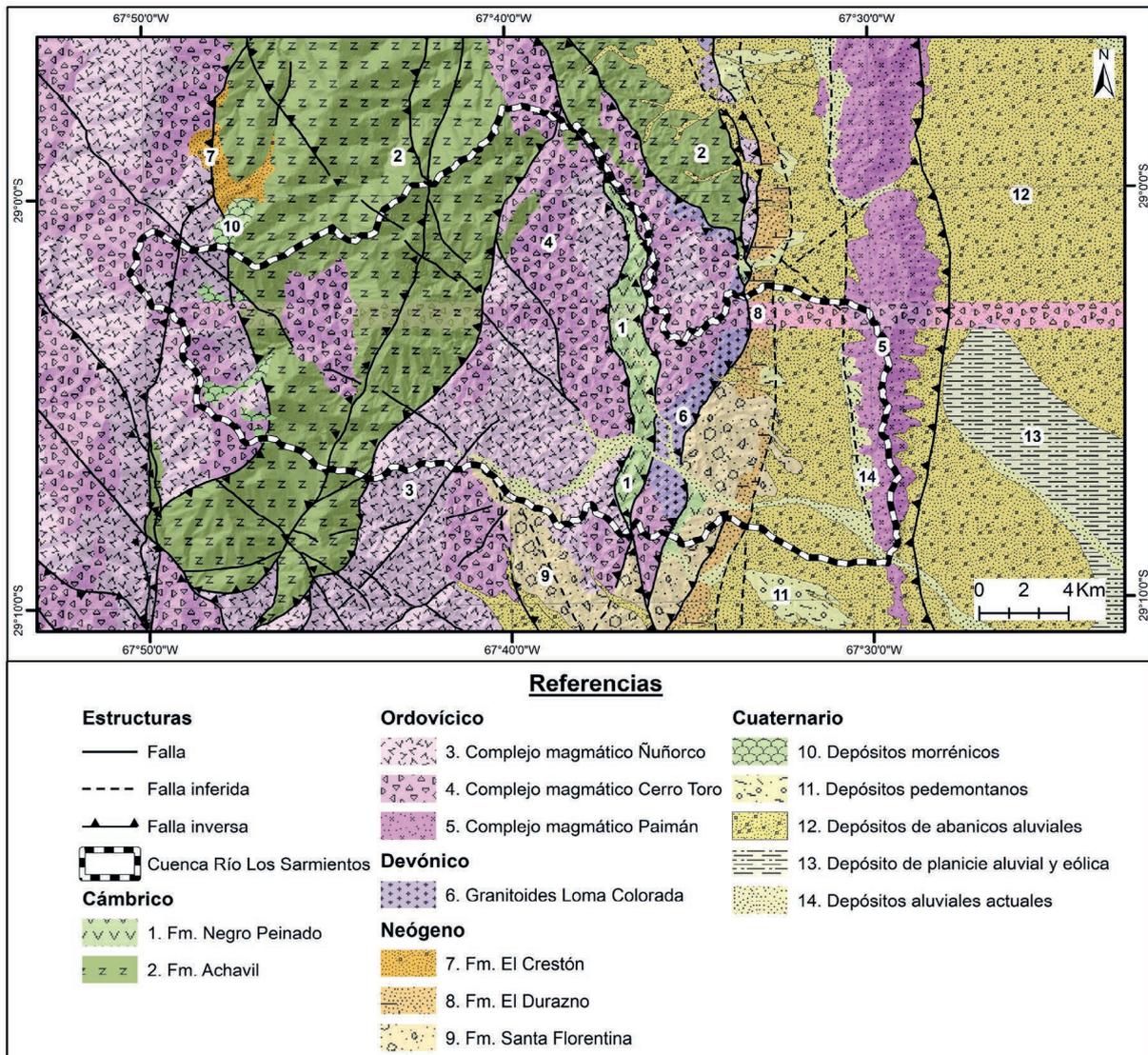


Figura 4. Mapa geológico de la CRLS y zonas aledañas. Modificado de Candiani *et al.*, 2011.

evento magmático que finalizará con los depósitos de tipo cobre porfídico (diseminados de Mo, Cu, Au) y filones epitermales de alta sulfuración de Cu-Au (Ag-As-Sb-Te), que alcanzan edades de $3,8 \pm 0,2$ Ma (Losada Calderón *et al.*, 1994). Los depósitos cuaternarios se encuentran representados por la Formación Santa Florentina (De Alba, 1979), compuesta por conglomerados clasto a matriz soportados, con matriz limoarenosa; luego continuados por varios niveles pedemontanos que presentan amplia distribución y conformados principalmente por depósitos gravosos: por último, los depósitos loésicos y aluviales actuales (Candiani *et al.*, 2011; Corbat *et al.*, 2020; Corbat, 2022 y Fig. 4).

El Sistema de Famatina se define estructuralmente, como una faja plegada y corrida que involucra al basamento y la cubierta en su deformación (Astini, 1998). Esta faja está caracterizada por presentar estructuras plegadas con núcleos y flancos fallados del Paleozoico superior e inferior,

sobrecorridos por láminas de basamento. Esta región comenzó a experimentar levantamientos como consecuencia del orógeno andino desde el Mioceno temprano (Dávila y Astini, 2007), los que involucran a la columna sedimentaria suprayacente (Fig. 4).

La geomorfología del área de análisis presenta dos zonas diferenciadas: Las sierras y los valles tectónicos. La cuenca está ubicada entre las sierras de Famatina y de Paimán. La primera de ellas alcanza su mayor altitud en el cerro General Manuel Belgrano (6.097 msnm). La Sierra de Paimán de distribución más localizada, presenta 70 km de largo y un ancho medio aproximado de 2 km (Corbat, 2022). Por otro lado, los valles tectónicos corresponden a las zonas deprimidas que alternan entre las sierras previamente descritas, y de las cuales reciben materiales producto de su degradación que son acumulados aquí. Estos valles, a diferencia de las sierras, están rellenos por depósitos del Cenozoico, donde se destacan los abanicos aluviales tanto actuales, como relictos y bajadas pedemontanas.

METODOLOGÍA

El procesamiento de la información se realizó en un Sistema de Información Geográfico (SIG), utilizando el programa QGIS 3.26 y se elaboró una base de datos cuantitativa para el análisis morfométrico. Se utilizó como base cartográfica un mosaico de imágenes del programa Google Earth, a escala 1:180.000, utilizando el complemento *Quick Map Services*. El sistema de referencia utilizado es POSGAR 2007 / Argentina 2 y el datum es WGS84. La altimetría se obtuvo del Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina (MDE-Ar V2.0), del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se digitalizaron todos los segmentos de cauce siguiendo la regla de la “V” topográfica. Cada segmento de cauce se jerarquizó siguiendo la metodología propuesta por Strahler (1964) y se lo efectuó de manera manual. Se definió como cauce principal al de mayor longitud desde la desembocadura a las nacientes. En el entorno de QGIS, se utilizaron diferentes herramientas de los programas integrados de SAGA y GRASS, que permitieron la delimitación de la cuenca, la realización de perfiles (herramienta *profile tool*) y la obtención de los insumos básicos para el cálculo de los parámetros e índices morfométricos. Los primeros corresponden a valores absolutos tales como: área, longitud, número de cursos, etc., mientras que, los índices son el resultado de la combinación de varios parámetros y en conjunto conforman las variables. Tanto los parámetros como los índices morfométricos se eligieron considerando que sean significativos para el análisis de la peligrosidad de crecidas en general (Esper Angillieri et al., 2016; Meza et al., 2018), y se los agrupó en 4 grupos: 1) Parámetros e índices vinculados con la forma de la cuenca; 2) Parámetros e índices asociados al relieve; 3) Índices relativos a la red de drenaje; 4) Índices relacionados con la intensidad del drenaje concentrado (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros e índices morfométricos calculados. Elaboración propia.

Factor	Parámetro / Índice
1) Forma y tamaño de la cuenca	Área (A)
	Perímetro (P)
	Longitud del curso principal (Lc)
	Razón de elongación (Re) (Schumm, 1956)
	Factor de forma (Kf) (Horton, 1932)
	Índice de compacidad (Ic) (Gravelius, 1914)
2) Relieve	Altura máxima
	Altura mínima
	Altura media
	Desnivel altitudinal
	Pendiente media de la cuenca
	Razón de relieve (Rr) (Schumm, 1956)
	Relación de relieve (R) (Melton, 1957)
3) Red de drenaje	Orden de la cuenca (Strahler, 1964)
	Relación de bifurcación (Rb) (Horton, 1945)
	Relación de longitud (Rl) (Horton, 1945)
4) Intensidad del drenaje concentrado	Densidad de drenaje (Dd) (Horton, 1945)
	Frecuencia de drenaje (Fd) (Strahler, 1964)
	Coefficiente de torrencialidad (Ct)
	Tiempo de concentración (Tc)

RESULTADOS

En el presente trabajo se realiza un análisis morfométrico de la CRLS, que presenta cuatro subcuencas: la del río del Oro, la del río Agua Negra, la del río Durazno y la del río Los Sarmientos (Fig. 5).

La CRLS presenta sus cabeceras en cercanías del cerro General Manuel Belgrano (Fig. 6A), sector donde el río tiene el nombre del Oro (Fig. 6 B) y escurre en sentido O-E. Por otro lado, el río Agua Negra (Fig. 6C) discurre NO-SE y se une al río del Oro para formar el río El Durazno (Fig. 6D) uniéndose aguas abajo con el río Los Sarmientos, que tiene una dirección N-S, y desde ese punto continúa con este último nombre (Fig. 6E). La CRLS termina en unas de las abras que presenta la sierra de Paimán, donde disminuye su pendiente formando un abanico aluvial de grandes dimensiones (Fig. 6F).

Parámetros e índices vinculados con la forma y el tamaño de la cuenca

Los parámetros e índices vinculados a las variables de tamaño y forma son reconocidos por ser de medición directa, es decir, que se obtienen de mediciones efectuadas en los documentos cartográficos base (Gil *et al.*, 2019). Algunos brindan información por sí solos y otros constituyen parámetros para el cálculo de nuevos índices (Jardí, 1985; Gentili, 2012).

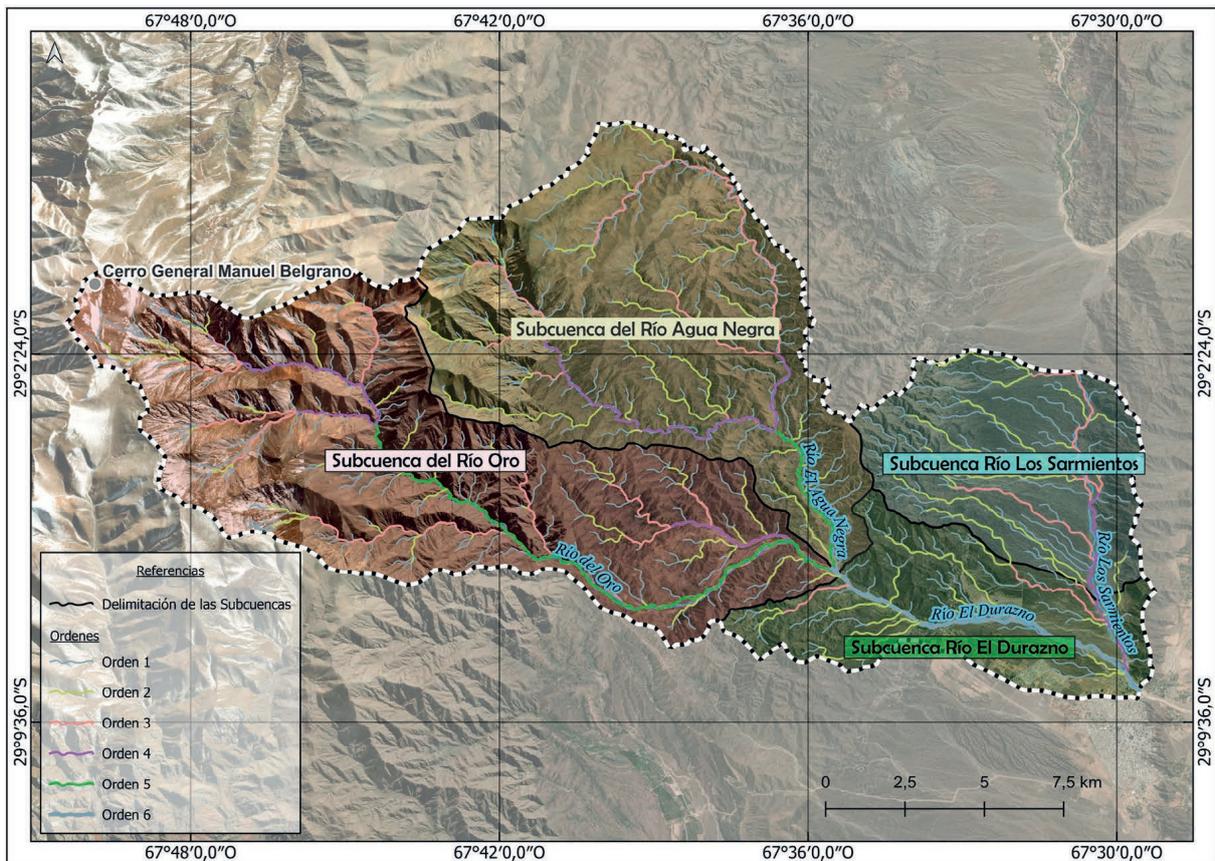


Figura 5. Mapa de ubicación de la cuenca de estudio, las subcuencas y los ríos involucrados. Elaboración propia.

La CRLS posee un área de 381,8 km², un perímetro de 109,2 km, y la longitud del río principal es de 41,55 km, cabe mencionar que el río principal es el río del Oro, su continuación como río El Durazno y el último tramo como río Los Sarmientos. La razón de elongación (Re) consiste en el cociente entre el diámetro de un círculo que posee la misma área que la cuenca y la longitud del curso principal que la drena. Los valores inferiores a 1 implican formas alargadas, y cuanto más se aleje de este valor, mayor será su elongación (Schumm, 1956; Sala y Gay, 1981). En la CRLS la Re es de 0,53, en donde, se lo relaciona con el comportamiento hidrológico ante eventos de crecida, los índices más bajos que la unidad indican cuencas elongadas y poseen mayor retardo en la concentración de la escorrentía en el cauce principal, como es este caso.

El factor de forma (K_f) es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca. Se interpreta que un K_f más próximo a la unidad identifica a cuencas circulares, mientras que los alejados de la unidad a cuencas elongadas (Senciales González, 1999). El K_f de la cuenca es de 0,29, distinguiéndose como ligeramente elongada. Estos dos índices (Re y K_f) son similares con lo indicado en Corbat (2022), en donde tiene una unidad de trabajo de mayores dimensiones a la CRLS, pero en la misma zona, con un Re de 0,58 y un K_f de 0,27.



Figura 6. A) Fotografía con vista para el este, de las nacientes del río del Oro en las cercanías del cerro General Manuel Belgrano. B) Fotografía de detalle, con vista aguas arriba del río del Oro, donde se pueden ver las coloraciones características, asociadas al drenaje ácido natural que presenta la zona ($29^{\circ}4'55,99''S$ y $67^{\circ}43'29,20''O$). C) Imagen del río Agua Negra con vista aguas arriba y sus aguas con colores blanquecinos ($29^{\circ}5'3,90''S$ y $67^{\circ}36'5,15''O$). D) Fotografía aguas arriba y con vista para el oeste, de la unión de los ríos del Oro y Agua Negra, donde el río toma el nombre del Durazno ($29^{\circ}6'40,72''S$ y $67^{\circ}35'26,03''O$). E) Fotografía aguas arriba y con vista para el oeste, de la unión del río El Durazno y el río Los Sarmientos, punto a partir del cual toma el nombre de este último. También se observa en la margen izquierda la circunvalación de Chilecito y parte de la expansión de nuevos barrios sin ordenamiento alguno sobre la llanura aluvial del río ($29^{\circ}8'38,34''S$ y $67^{\circ}29'51,06''O$). F) Imagen aérea aguas abajo y con vista para el este donde se puede observar el abanico aluvial que en la actualidad se encuentra antropizado, con el desarrollo de varios asentamientos y al fondo la sierra de Velasco. Elaboración propia.

El índice de compacidad o Gravelius (Gravelius, 1914), compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo se aproxima a la misma área de la cuenca en estudio. Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de la circunferencia. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar grandes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea (Senciales González, 1999). Para el caso de la CRLS es de 1,56 el cual representa una cuenca oval oblonga a rectangular oblonga.

Parámetros e índices asociados al relieve

La CRLS tiene una altura máxima de 6.097 msnm, la mínima de 1.154 msnm, la media de 3.625 msnm, el desnivel altitudinal de 4.943 msnm, la pendiente media de la cuenca de 11,9 %, la cual es importante a fines interpretativos, ya que la velocidad que puede llevar un caudal a lo largo del cauce, es lo que condiciona su energía cinética y, por lo tanto, su potencia erosiva (Senciales González, 1999).

A partir del análisis del mapa de pendientes (Fig. 7A) se puede observar que las mayores pendientes se encuentran en la cuenca alta y, a medida que desciende en altitud las pendientes son menos pronunciadas, esto se pone en manifiesto a través de los perfiles longitudinales de los ríos del Oro (Fig. 7B) y Agua Negra (Fig. 7C), por otro lado, los perfiles longitudinales del río El Durazno (Fig. 7D) y río Los Sarmientos (Fig. 7E), que se encuentran en la cuenca media y baja presentan una pendiente más baja y uniforme.

Del análisis de las pendientes, de los perfiles longitudinales y del reconocimiento de campo se pueden identificar las zonas donde cambian las condiciones morfológicas de los valles, dejando de ser estrechos y encajonados para ser amplios, para observar dicha condición se realizaron perfiles transversales (Fig. 8). Estas condiciones que cambian podrían tener relación con la litología (Fig. 4), ya que en la parte encajonada discurren sobre sustrato rocoso y cuando se ensancha discurren por depósitos aluviales con disponibilidad de sedimentos (Fig. 8E y F) y también en menor medida a un control estructural (Fig. 4). También del análisis de los perfiles y de las pendiente se puede inferir que en la cuenca alta, cuando discurre por parte encajada y sustrato rocoso podrían estar actuando procesos de erosión y en la cuenca media / baja cuando discurre por parte ensanchada y por depósitos aluviales, como la zona de acumulación de sedimentos, y en esta zona se incrementa la peligrosidad como consecuencia de los procesos de avulsión o elevación de lecho.

La razón de relieve (R_r) es definida como la relación entre el desnivel máximo de la cuenca y su longitud máxima (Schumm, 1956). Este índice se relaciona con la pérdida anual de sedimento, siendo que una alta razón de

relieve implica la posible mayor velocidad del agua y su mayor capacidad erosiva (Sala y Gay, 1981; Gil *et al.*, 2019). Esta capacidad es potencial, ya que depende de la presencia del caudal, de la intensidad de las precipitaciones que provocan caudales diferentes y de la resistencia del sustrato a ser erosionado por la acción mecánica (Gisbert Gallego, 2001). El resultado obtenido para este índice fue 0,13 para toda la cuenca, que indicaría un aporte de sedimentos de moderado a alto. Otro índice complementario es la Relación de Relieve (R), referido a la relación entre el desnivel máximo de la cuenca y el perímetro de la misma (Melton, 1957). El valor obtenido de este último índice para la cuenca es 0,05. Los parámetros e índices calculados para la cuenca indican que presenta un gran desnivel altitudinal, con lo cual, alcanza alto poder erosivo, en búsqueda de su nivel de base, que actualmente está representado por el abanico aluvial Chilecito (Figs. 6F y 7A).

Parámetros e índices relativos a la red de drenaje

La CRLS tiene una jerarquía de la red de drenaje del orden 6 (Strahler, 1964), con un total de 607 cauces, en donde gran parte son de primer orden (79,2%), y en menor medida los de segundo orden con un 15,3 % (Tabla 2 y Fig. 5).

Se entiende por relación de bifurcación (Rb) a la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato superior (Horton, 1945). Este índice permite establecer un orden relativo entre cuencas de mayor o menor rapidez de propagación de la onda de crecida, lo que define de alguna manera, el grado de peligrosidad de la cuenca (Gil *et al.*, 2019). Los índices bajos suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, lo que repercute directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas (Jardí, 1985; Senciales González, 1999; Gómez *et al.*, 2017; Meza *et al.*, 2018). Por otro lado, los valores próximos a 2 revelan cuencas o áreas de escaso relieve; los valores entre 3 y 5 corresponden a áreas montañosas con escasa dependencia estructural, y aquellos valores superiores a 5 indican una fuerte dependencia estructural (Senciales González, 1999).

Tabla 2. Órdenes de la cuenca en donde se pueden observar la cantidad de cauces y el porcentaje de cada uno de los órdenes.

Órdenes de la cuenca (Strahler, 1964)					
Orden 1	Orden 1	Orden 1	Orden 1	Orden 1	Orden 1
482 (79,2%)	93 (15,3%)	24 (3,95%)	6 (0,99%)	2 (0,33%)	1 (0,16%)

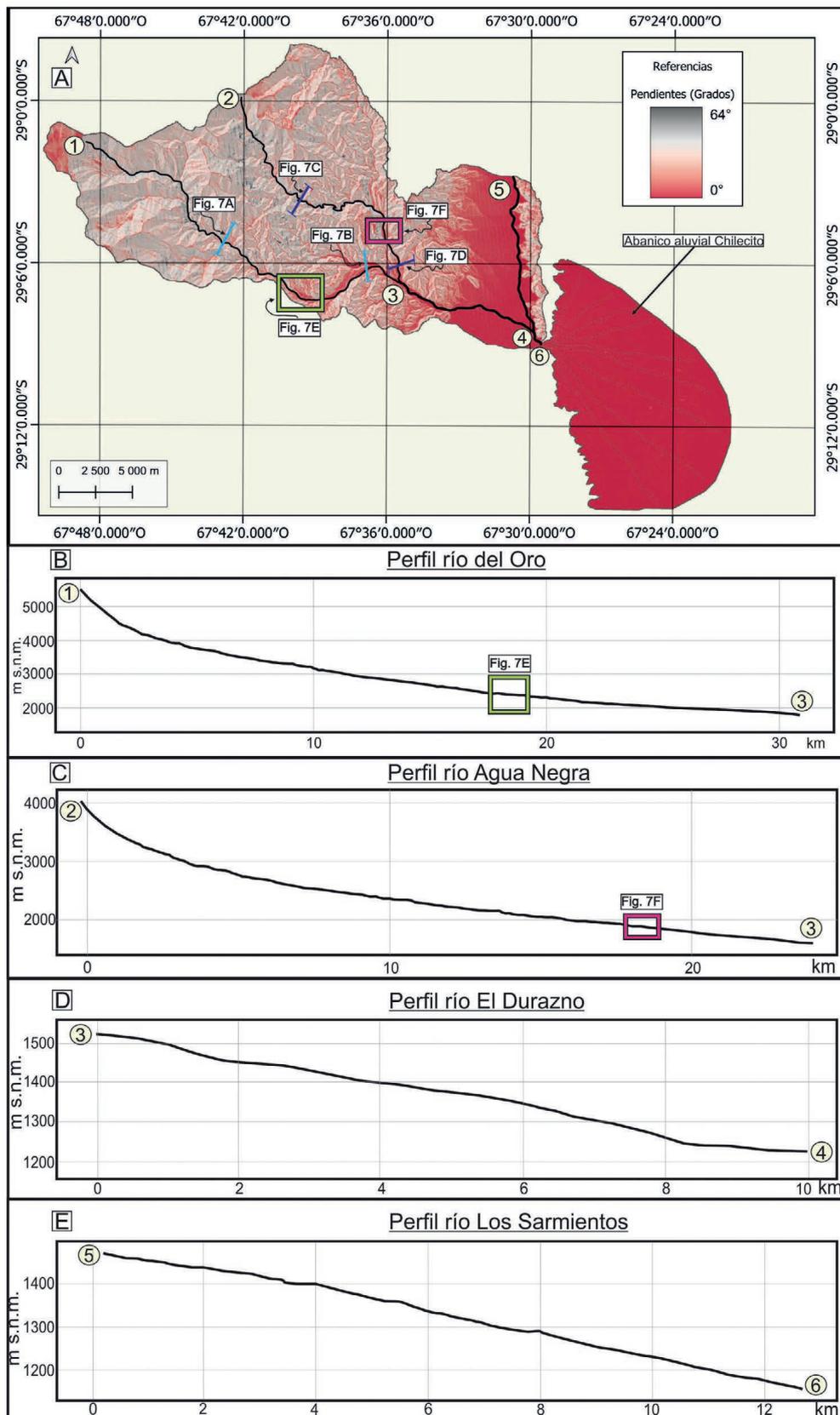


Figura 7. A) Mapa de pendientes de la CRLS. B) Perfil longitudinal del río del Oro. C) Perfil longitudinal del río Agua Negra. D) Perfil longitudinal del río El Durazno. E) Perfil longitudinal del río Los Sarmientos.

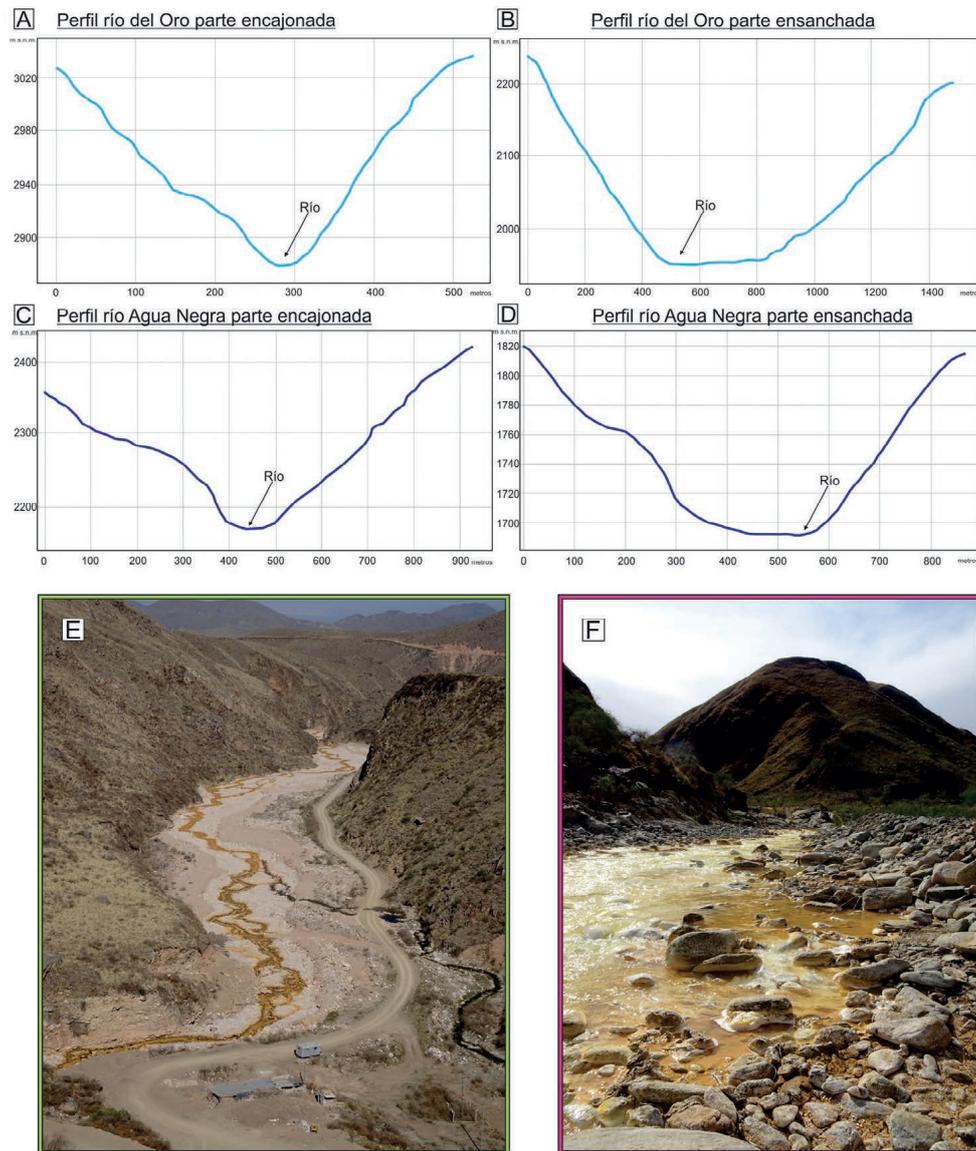


Figura 8. A) Perfil trasversal del río del Oro en su parte encajonada. B) Perfil trasversal del río del Oro en su parte ensanchada. C) Perfil trasversal del río Agua Negra en su parte encajonada. D) Perfil trasversal del río Agua Negra en su parte ensanchada. E) Fotografía con vistas al Este, donde se puede observar el ensanchamiento del valle del río del Oro, en donde se junta con el cauce tributario Agua Clara ($29^{\circ} 5'55,21''S$ y $67^{\circ}41'50,89''O$). F) Fotografía con vista aguas arriba y para el Oeste, de la zona del ensanchamiento del río Agua Negra ($29^{\circ} 3'53,56''S$ y $67^{\circ}36'41,85''O$). Cabe mencionar que la traza de los perfiles y ubicaciones de las fotografías están referenciados en la figura 7A.

En la cuenca analizada el Rb promedio es de 4,01 (Tabla 3), es decir que se ubica en el rango de valores que indican de escaso a medio control estructural. Al observar la relación de bifurcación entre los órdenes sucesivos, se determina que en la parte alta de la cuenca hay un control estructural marcado, definido por el valor Rb entre el orden 1-2 mayor a 5.

La Relación de longitud (Rl) es definida como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior (Horton, 1945). En general los

Tabla 3. Relación de bifurcación entre los diferentes órdenes de la cuenca. Elaboración propia.

Relación de bifurcación (Rb)				
Rb (1-2)	Rb (2-3)	Rb (3-4)	Rb (4-5)	Rb (medio)
5,18	3,88	4,00	3,00	4,01

Tabla 4. Relación de longitud entre los diferentes órdenes de la cuenca. Elaboración propia.

Relación de longitud (Rl)				
Rl (2-1)	Rl (3-2)	Rl (4-3)	Rl (5-4)	Rl (medio)
0,34	0,89	1,46	4,31	1,75

cauces que presentan menores longitudes suelen estar situados en áreas de fuertes pendientes. Los valores medios cercanos a 1,5 en aquellas cuencas en las que se incrementa poco la longitud de los cauces y 3 para las cuencas en las que los órdenes superiores presentan grandes longitudes (Senciales González, 1999). En el caso de la CRLS el valor medio obtenido es 1,75, el cual representa un valor intermedio (Tabla 4).

La existencia de distintos valores en la Rl entre segmentos de diferentes órdenes se interpreta como indicio de dos situaciones erosivas en una misma cuenca que, en este caso puede deberse a la configuración litológica y topográfica de la cuenca (Sala y Gay, 1981), que se podría aplicar en la cuenca de estudio. A su vez, altas Rl revelan una concentración paulatina de caudales a lo largo del colector principal, mientras que bajas relaciones muestran mayor energía concentrada bruscamente (Gil *et al.*, 2019), es decir que en la CRLS los Rl de órdenes inferiores presentan concentraciones bruscas y los órdenes superiores concentraciones paulatinas. Esto es coincidente con el análisis de las pendientes, en donde al cambiar las condiciones morfológicas, cambian las condiciones hidrológicas del río.

Uno de los factores que condiciona las características hidrológicas es la litología de la zona; en la cuenca alta el agua discurre sobre sustrato rocoso, con mayores posibilidades de concentraciones bruscas, y luego pasa a ser un cauce más amplio, cubierto de depósitos sedimentarios debido a acciones fluviales previas, implican un incremento de la permeabilidad y, por ende, aumenta la infiltración, por lo tanto, se genera una disminución en las posibilidades de concentraciones bruscas, más bien oficia como un agente menguante del proceso. También cabe mencionar, que ante un evento extraordinario la disponibilidad de sedimentos aumenta la carga sólida en el evento, aumentando la peligrosidad.

Índices relacionados con la intensidad de drenaje concentrado

La densidad de drenaje (Dd) indica la relación entre la longitud total de los cursos de agua de una cuenca (Lt) y el área total de la misma (A). Representa la eficiencia de drenaje y señala el estado erosivo de una cuenca hidrográfica (Senciales González, 1999). Un área con alta densidad de drenaje posee mayor superficie ocupada por canales de drenaje reservando una superficie de dimensiones variables para conducir con mayor velocidad el caudal generado por el agua de escorrentía (Horton, 1945). En la CRLS la Dd es de $1,65 \text{ km/km}^2$, que se interpreta como baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica, así como en materiales muy permeables y con alta infiltración (Horton, 1945; Gregory y Wallings, 1973; Morisawa, 1985; Marchetti, 2000). Este parámetro al ser un cociente expresa la totalidad de la cuenca y coincide con los parámetros antes calculados (Rb , Rl y pendientes).

La frecuencia de drenaje (Fd) se determina a partir de la relación entre el número total de cursos de primer orden y el área total de la cuenca. Este índice señala la intensidad de los procesos iniciales de arroyada y permite inducir las posibles causas al relacionarlo con otros factores del medio como la cubierta vegetal o las precipitaciones (Strahler, 1964). El valor obtenido para la CRLS es de $1,26 \text{ cauces/ km}^2$.

El coeficiente de torrencialidad (Ct) se obtiene luego de multiplicar la densidad de drenaje por la frecuencia de drenaje. A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Díaz *et al.*, 1987). Es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempos de llegada al pico de crecida y alta torrencialidad. En otras palabras, los cursos de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de inundaciones aluvionales veloces (Busnelli y Horta, 2014). El resultado es una aproximación al estudio de máximas de crecidas debido a que se encuentra relacionado con la capacidad de descarga de la cuenca (Senciales González, 1999). En la CRLS el Ct es de $2,08 \text{ cauces/km}^2$, lo cual indica una torrencialidad media y probabilidad de crecidas repentinas o rápidas.

El Tiempo de concentración (Tc) es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida (Ven Te Chow, 1994). Los tiempos de concentración calculados son los siguientes: para la fórmula de Kirpich 158 min o $2,63 \text{ hs}$ (Kirpich, 1940), para la de Giandotti $174,58 \text{ min}$ o $2,91 \text{ hs}$ (Arbeláez *et al.*, 1997) y $158,85 \text{ min}$ o $2,65 \text{ hs}$ para la de California Culvert practice (Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2011). Estos Tc fueron utilizados porque tienen en cuenta la diferencia de altura, longitud del cauce principal y la pendiente de la cuenca, sin embargo, no tiene en

cuenta la permeabilidad, fracturamiento de la roca, vegetación, entre otras variables, pero nos dan una medida aproximada del comportamiento de la cuenca ante una eventual crecida. Considerando que la longitud del cauce principal es de 41,55 km, el tiempo de concentración es corto y requeriría una evacuación muy rápida y organizada para las áreas urbanizadas ubicadas en el entorno inmediato de la desembocadura del río.

CONCLUSIONES

Los parámetros e índices morfométricos obtenidos caracterizan cuantitativamente a la CRLS, La Rioja, Argentina. A su vez, permiten inferir condiciones de escurrimiento y disponibilidad de agua, que ayudan a conocer la dinámica hídrica.

De acuerdo con los parámetros e índices relacionados a la forma y el tamaño, se trata de una cuenca de tamaño medio a grande, con forma elongada, lo cual puede producir un retardo en la concentración de la esorrentía.

En cuanto al relieve, el análisis indica que presenta un gran desnivel altitudinal, con pendientes elevadas en la parte alta de la sierra y luego una disminución de la pendiente a medida que disminuye la topografía. Identificando zonas donde cambian las condiciones morfológicas de los valles, dejando de ser estrechos y encajonados para ser amplios. Este cambio está relacionado con las litologías presentes: en los tramos más estrechos, el río discurre sobre un sustrato rocoso, mientras que, en las zonas más amplias, lo hace sobre depósitos aluviales. Por lo antes mencionado, y del análisis de los perfiles longitudinales y transversales, la cuenca alta (parte encajonada) estaría siendo erosionada en busca del nivel de base y cuenca media / baja (parte ensanchada) como la zona de acumulación de sedimentos, por lo cual al estar ubicada la ciudad de Chilecito en esta zona, se podría incrementar la peligrosidad como consecuencia de los procesos de avulsión o elevación de lecho.

Los parámetros relativos al drenaje exhiben una jerarquía de orden 6, con un alto porcentaje de cauces de primer orden. Uno de los factores determinantes de este cambio es la litología de la zona, que en la cuenca alta discurre sobre sustrato rocoso, con mayores posibilidades de concentraciones bruscas y luego pasa a ser un cauce más amplio, con disponibilidad de materiales que hacen que aumente la permeabilidad del mismo y por lo tanto, disminuyan las posibilidades de concentraciones bruscas, pero también cabe mencionar, que ante un evento extraordinario la disponibilidad de sedimentos aumenta la carga sólida en el evento, aumentando la peligrosidad.

De acuerdo con la intensidad del drenaje concentrado, presenta una baja densidad de drenaje, coincidente con la atenuación de la esorrentía que se produce en los cauces de orden superior. Por otro lado, la cuenca

presenta una torrencialidad y probabilidad de crecidas espontáneas media y un tiempo de concentración en un rango de 2,63–2,91 hs.

Por lo tanto, la CRLS tiene dependencia litológica, topográfica, estructural y morfológica. También es importante mencionar que existen otros factores como la frecuencia, intensidad y tiempo de duración de la tormenta. Asimismo, la existencia de lluvias previas reduce la infiltración y aumenta consiguientemente la impermeabilidad de la cuenca, favoreciendo una rápida descarga y volviéndola potencialmente peligrosa ante eventos de crecidas extraordinarias, como muestran los antecedentes que presenta la cuenca.

Estudios como el efectuado ofrecen importante información de base para posteriores estudios de ordenamiento territorial y de análisis de riesgos. Por último, la metodología puede ser aplicada en otras regiones montañosas de similares características, principalmente aquellas zonas donde la información hidrometeorológica y climática es escasa o nula y no es posible efectuar otros cálculos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Lic. Víctor Mercado, administrador de la agencia Chilecito del diario “El Independiente” por la información e imágenes compartidas. También a la Prof. Daimar Salinas Del Canto, por las traducciones realizadas. Y por último, a los revisores por las sugerencias y comentarios, que enriquecieron y mejoraron sustancialmente este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alasino, P.H., Dahlquist, J.A., Pankhurst, R.J., Galindo, C., Casquet, C., Rappela, C.W., Larrovere, M. and Fanning, C.M. 2012. Early Carboniferous sub- to mid-alkaline magmatism in the Eastern Sierras Pampeanas. NW Argentina: a record of crustal growth by the incorporation of mantle-derived material in an extensional setting. *Gondwana Research* 22: 992-1008.
- Arbeláez, A.C., Vélez, M.V. y Smith, R. 1997. Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: río San Carlos. *Avances en Recursos Hidráulicos* N°4.
- Astini, R.A. 1998. El Ordovícico de la región central del Famatina (provincia de La Rioja, Argentina): aspectos stratigráficos, geológicos y geotectónicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53(4): 445-460.
- Bianchi, A.R., Yáñez, C.E. y Acuña, L.R. 2005. *Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino*. Proyecto Riesgo Agropecuario N° 141. INTA-SAGPYA.

- Busnelli, J. y Horta, L.R. 2014. Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(1):11-20. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v71n1/v71n1a02.pdf>
- Candiani, J.C., Astini, R.A., Dávila, F., Collo, G., Ezpeleta, M., Alasino, P., Dahlquist J. y Carrizo R. 2011. *Hojas geológicas 2969-18 Famatina y 2969-24 Sañogasta, 1:100.000*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín 379.
- Collo, G., Dávila, F.M., Candiani, J.C. y Astini, R.A. 2006. Plegamiento transversal a la deformación oclóyica en rocas pre-ordovícicas del Sistema de Famatina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(1): 112-117.
- Corbat, M.C. 2022. *Relación geomorfología-hidrología del Valle de Antinaco – Los Colorados, Sierras Pampeanas y Sistema de Famatina, provincia de La Rioja*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Corbat, M.C., Juárez, O. and Fucks, E. 2020. Hydrologic and geomorphologic features of the Río del Oro basin, La Rioja province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 104:1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102896>
- Dahlquist, J.A., Pankhurst, R.J., Gaschnig, R.M., Rapela, C.W., Casquet, C., Alasino, P.H., Galindo C. and Baldo, E.G. 2013. Hf and Nd isotopes in Early Ordovician to Early Carboniferous granites as monitors of crustal growth in the Proto-Andean margin of Gondwana. *Gondwana Research* 23: 1617-1630.
- Dávila, F.M. y Astini, R.A. 2003. Las eolianitas de la sierra de Famatina (Argentina): Interacción paleoclima-tectónica en el antepaís fragmentado andino central durante el Mioceno Medio?. *Revista Geológica de Chile* 30(2): 87-204.
- Dávila, F.M. and Astini, R.A. 2007. Cenozoic provenance history of synorogenic conglomerates in western Argentina (Famatina Belt): Implications for Central Andean foreland development. *Geological Society of America Bulletin* 119 (5/6): 609–622.
- De Alba, E. 1979. *Descripción geológica de la Hoja 16d, Chilecito (provincia La Rioja)*. Servicio Geológico Nacional. Boletín 163.
- Díez Herrero, A., Laín Huerta, L. y Llorente Isidro, M. 2008. *Mapa de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Esper Angillieri, M. Y., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L. 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.
- Gentili, J. 2012. *Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de inundaciones y anegamientos. Bahía Blanca, Argentina*. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur.

- Gil, V., Volonté A. y Campo A. 2019. Índices morfométricos a diferentes escalas aplicados al peligro de crecida en cuencas pequeñas. Cuenca del Arroyo San Bernardo, Argentina. *Revista Brasileira de geomorfología* 20(4): 811-824.
- Gisbert Gallego, J.M. 2001. *Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del río Monachil (Granada)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Gómez, R. D., Gaspari, F. J. y Georgieff, S. M. 2017. Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta Geológica Lilloana* 29(1): 3-19.
- Gravelius, H. 1914. Grundrifi der gesamten Gewässerkunde. *Compendium of Hydrology*. Berlín: Goschen.
- Gregory, K.J. and Walling, D.E. 1973. *Drainage basin. Form and process: A geomorphological approach*. Ed. Edwards Arnold, Londres.
- Horton, R. 1932. Drainage basin characteristics. *American Geophysical Union Transactions* 13: 350-361.
- Horton, R. 1945. Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphologie. *Geological Society American* 56: 275-370.
- Ibisate González de Matauco, A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la AGE* 38: 311 – 329.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo, Argentina (INDEC). 2022. *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022, Indicadores demográficos, por sexo y edad*. ISBN 978-950-896-654-4. Disponible en: <https://portal-geoestadistico.indec.gob.ar/> (Fecha de acceso: 05-11-2024).
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía. Barcelona*. Departamento de Geografía de la Universidad de Barcelona 19: 41-68.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering* 10(6): 362.
- Losada Calderón, A.J., McBride, S.L. and Bloom, M.S. 1994. The geology and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of magmatic activity and related mineralization in the Nevados del Famatina mining district. La Rioja province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 7(1): 9-24.
- Marchetti, M. 2000. *Geomorfología Fluviale*. Ed. Pitagora Editrice, Bologna, 247.
- Melton, M. A. 1957. An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology. Office naval research. *Geography Branch, Technical reports* 11.
- Meza, J. R., Torres, R. J. y Chacón, S. A. 2018. Análisis morfométrico de las microcuencas en el ámbito de las cataratas de Gocta, Chinata y Yumbilla-El Chido, región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable* 2(2): 60-69.

- Morisawa, M.E. 1985. *Rivers, form and processes*. Ed. Longman, London, 222.
- National Oceanic and Atmospheric Administration's / National Weather Service (NWS/NOAA). 2013. Glossary. <http://www.weather.gov/glossary/>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen- Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(5):1633–1644.
- Rapela, C.W., Pankhurst R. J., Baldo, Casquet, C., Galindo, C., Fanning, C. M. and Saavedra, J. 2001. Ordovician metamorphism in the Sierras Pampeanas: New U-Pb shrimp ages in central east Valle Fértil and the Velasco batholith. *Third South American Symposium on Isotope Geology (SSAGI)*.
- Romero Díaz, M. A. y López Bermudez, F. 1987. Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía* 12: 47-62.
- Sala, M. y Gay, R. 1981. Algunos datos morfométricos de la cuenca de Isábena. *Notes de Geografía Física. Department de Geografia, Universitat de Barcelona* 4: 41–65.
- Schumm, S. 1956. The evolution of dainage system and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America* 67: 597-645.
- Senciales González, J.M. 1999. *Redes fluviales. Metodología de análisis*. Universidad de Málaga. España.
- Sosic, M. 1971. Descripción hidrogeológica del Valle de Antinaco-Los Colorados, prov. de La Rioja. Buenos Aires. *Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín* 123.
- Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: V.T. Chow (ed.). *Handbook of applied hydrology*. Mac Graw Hill, New York: 439-476.
- Turner, J.C. 1960. Estratigrafía del tramo medio de la sierra de Famatina y Adyacencias. La Rioja. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 42 (1): 77-126.
- Vélez Upegui, J.J. y Botero Gutiérrez, A. 2011. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. *DYNA Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín* 78(165): 58-71.
- Ven Te Chow. 1994. *Hidráulica de los canales abiertos*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. ISBN: 07-010776-9.