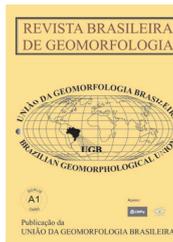


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, n° 4 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1598>



ÍNDICES MORFOMÉTRICOS A DIFERENTES ESCALAS APLICADOS AL PELIGRO DE CRECIDAS EN CUENCAS PEQUEÑAS. CUENCA DEL ARROYO SAN BERNARDO, ARGENTINA

ÍNDICES MORFOMÉTRICOS A DIFERENTES ESCALAS APLICADOS AO PERIGO DE CRECIDAS EM BACIAS PEQUENAS. BACIA DO ARROYO SAN BERNARDO, ARGENTINA

MORPHOMETRIC INDICES AT DIFFERENT SCALES APPLIED TO THE DANGER OF FLOODING IN SMALL BASINS. BASIN OF THE STREAM SAN BERNARDO, ARGENTINA

Verónica Gil

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional del Sur
12 de octubre 1198, 4° piso Gabinete 17. Bahía Blanca, Argentina*

ORCID: 0000-0002-2824-204X

E-mail: verogil@uns.edu.ar

Antonela Volonté

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional del Sur
12 de octubre 1198, 4° piso Gabinete 17. Bahía Blanca, Argentina*

ORCID: 0000-0003-3523-5881

E-mail: antonela.volonte@uns.edu.ar

Alicia M. Campo

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional del Sur
12 de octubre 1198, 4° piso Gabinete 17. Bahía Blanca, Argentina*

ORCID: 0000-0003-1150-4039

E-mail: amcampo@uns.edu.ar

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
21/04/2019

Aceito (Accepted):
19/07/2019

Keywords:

Morfometría; Cuencas no Aforadas; Peligro de Crecidas; Escalas Espaciales.

Resumen

La morfometría fluvial ayuda a la interpretación del comportamiento morfodinámico e hidrológico en cuencas. La determinación de la escala de trabajo es importante ya que un cambio en la misma genera una variación en los resultados y modifica la aplicabilidad de los índices. Pero esta variación ¿se da en todos los índices? el objetivo de este trabajo es estudiar la morfometría fluvial y comparar índices morfométricos a diferentes escalas espaciales en la cuenca del arroyo San Bernardo. La misma se ubica en el centro-sur del Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires (Argentina). Tiene una superficie de 82 km², no posee aforo y en ella se generan crecidas torrenciales ante la ocurrencia de eventos de precipitación

Palavras-chave:
Morfometria; Risco de
Inundações Repentinas; Escalas
Espaciais.

Keywords:
Morphometry; Ungauged
Basins; Flash Flood Hazard;
Spatial Scales.

intensa (100 mm/24 h). Se compararon los resultados obtenidos a escala 1:50.000 (escala cartográfica oficial de mayor detalle en la Argentina) y 1: 1.400 (escala de mayor aproximación a la realidad de la cuenca obtenida de Google Earth). Se calcularon los parámetros de área (A), perímetro (P), longitud del cauce (lc), altura (h), desnivel (D), pendiente y los índices: Relación de elongación (Re), Razón de relieve (Rr), Relación de relieve (R), Relación de bifurcación (Rb), Relación de longitud (Rl), Coeficiente de Torrencialidad (Ct), Densidad de drenaje (Dd) y Frecuencia de drenaje (Fd) relevantes para el estudio de crecidas. Los resultados de los índices Rb y Re asociados a la topología y forma respectivamente revelan

una cuenca con potencialidad alta de generar crecidas torrenciales. Los valores obtenidos para los índices Dd y Ct refuerzan lo dicho anteriormente. Los índices en ambas escalas se mantienen en el rango clasificatorio, aunque los valores obtenidos a escala mayor se aproximan a la situación real. El uso de mayor detalle genera resultados más adecuados en los índices influenciados por las propiedades de la red de drenaje por lo que mejora el análisis morfométrico para cuencas pequeñas.

Resumo:

A morfometria fluvial auxilia na interpretação do comportamento morfodinâmico e hidrológico em bacias hidrográficas. A determinação da escala de trabalho é importante, pois uma mudança pode gerar uma variação nos resultados e modificar a aplicabilidade dos índices. Mas esta variação ocorre em todos os índices? O objetivo deste trabalho é estudar a morfometria fluvial e comparar índices morfométricos em diferentes escalas espaciais na bacia do rio San Bernardo. Essa bacia está localizada no centro-sul do Sistema Ventania, província de Buenos Aires (Argentina). Possui uma superfície de 82 km² e não existe medições de caudal do rio. Os resultados obtidos foram comparados em uma escala de 1:50.000 (escala cartográfica oficial de maior detalhe na Argentina) e 1:1.400 (escala de maior aproximação a realidade da bacia obtida no Google Earth). Foram calculados os parâmetros de área (A), perímetro (P), comprimento do canal (lc), altura (h), desnível (D), declividade e os índices: Razão de alongamento (Re), Razão de relevo (Rr), Relação de Relevo (R), Relação de bifurcação (Rb), Relação de comprimento (Rl), Coeficiente de torrencialidade (Ct), Densidade de drenagem (Dd) e Frequência de drenagem (Fd) relevantes para o estudo de inundações. Os resultados dos índices Rb e Re associados à topologia e à forma, respectivamente, revelam uma bacia com potencialidade alta para gerar inundações repentinas. Os valores obtidos para os índices Dd e Ct reforçam o que foi dito anteriormente. Os índices, em ambas escalas, se mantêm no ranking de classificação, no entanto, os valores obtidos em uma escala maior se aproximam da situação real. O uso de mais detalhes gera resultados mais adequados nos índices influenciados pelas propriedades da rede de drenagem pois melhora as análises morfométricas para bacias pequenas.

Abstract:

Fluvial morphometry aid in the interpretation of morphodynamic and hydrological behavior in watersheds. The determination of the scale of work is important since a change in it generates a variation in the results and modifies the applicability of the indexes. But does this variation occur in all the indexes? The objective of this work is to study fluvial morphometry and compare morphometric indices at different spatial scales in the San Bernardo river basin. It is located in the center-south of the Sistema de Ventania, Buenos Aires (Argentina). It has an area of 82 km², it does not have capacity and it generates torrential floods before the occurrence of intense precipitation events (100 mm / 24 h). The results obtained were compared at a scale of 1: 50.000 (official cartographic scale of greater detail in Argentina) and 1: 1.400 (scale closest to the reality of the basin obtained from Google Earth). The parameters of area (A), perimeter (P), channel length (lc), height (h), slope (D), slope and the indices were calculated: Ratio of elongation (Re), Reason of relief (Rr), Relief ratio (R), Bifurcation ratio (Rb), Length ratio (Rl), Torrentiality coefficient (Ct), Drainage density (Dd) and Drainage frequency (Fd) relevant to the study of floods. The results of the Rb and Re indexes associated with the topology and shape respectively reveal a basin with

high potential to generate torrential floods. The values obtained for the Dd and Ct indices reinforce what has been said previously. In both, scales the indexes maintain in the rank of classification, however, those of major scale approach the real situation. The use of more detail, as in this case, allows to improve the results in small basins and in indexes influenced by the properties of the drainage network.

Introducción

Las características topográficas, geomorfológicas, cobertura vegetal y uso del suelo de una cuenca hidrográfica influyen en la forma en que el agua y el sedimento circula por ella. Para el caso de cuencas que disponen de información hidrológica y meteorológica los estudios hidrográficos, geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos se pueden realizar utilizando diferentes metodologías. Sin embargo, es importante definir formas de estudio de la dinámica fluvial en sectores donde las estaciones de aforo son inexistentes (Busnelli y Horta, 2014). En el caso de la morfometría fluvial su estudio posibilita conocer la respuesta hidrológica de la cuenca y valorar formas y procesos de erosión y agradación dominantes en la dinámica fluvial. Numerosos autores han desarrollado índices morfométricos y evaluado su aplicabilidad, entre ellos se destacan: Horton (1945), Tricart (1973), Strahler (1974), Morisawa (1986), Leopold *et al.* (1995); Knighton (1998) y actualmente algunos como Garry *et al.* (2002) y Lelievre *et al.* (2008); Gómez *et al.* (2017); Meza *et al.* (2018).

Existen diversos trabajos que estudiaron a través de índices morfométricos, técnicas geomorfológicas y Sistemas de Información Geográfica el riesgo de inundación y también generaron cartografía específica a los efectos de comprender el comportamiento fluvial durante las inundaciones (Bajabaa *et al.*, 2013; Grecu, 2008; Thomas *et al.* 2012, Magesh *et al.* 2013, Olcina Cantos y Díez Herrero, 2017 y Schomwandt *et al.*, 2018). Conocer las propiedades morfométricas de las cuencas hidrográficas proporciona una descripción física espacial que permite realizar comparaciones entre estas. 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 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 (Ibiate, 2004). El comportamiento del caudal y el de las crecidas, puede

ser explicado por una serie de propiedades morfométricas, como el tamaño, la forma y la pendiente, que resultan muy importantes en la respuesta del caudal recibido y que pueden operar tanto para atenuar como para intensificar las crecidas. La mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento (Senciales González, 1999, Díez Herrero et al., 2008)

En la cuenca del arroyo San Bernardo, localizada en el suroeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), se generan crecidas provocadas por eventos de lluvias intensas (ej. 100 mm/24 h) que afectan a la población situada en las márgenes. Estas crecidas son de tipo torrencial (*flash flood*) y ocasionan la inundación de sectores urbanos aledaños al cauce principal. La cuenca no posee información hidrometeorológica continua y actual que ayude al análisis hidrológico de crecidas. Por ello, el objetivo de este trabajo es estudiar la morfometría fluvial y comparar índices morfométricos a diferentes escalas espaciales en la cuenca del arroyo San Bernardo. El fin doble de este trabajo es definir un umbral mínimo de escala de trabajo que represente la realidad para cuencas pequeñas y mejorar la calidad de los resultados morfométricos aplicados al análisis hidrológico destacando de esta forma la importancia de la elección de la escala en este tipo de estudios.

Área de estudio

La cuenca del río Sauce Grande se encuentra localizada en el suroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El curso principal tiene su nacimiento en el sector cercano al Cerro Destierro Primero (1100 m), drena las laderas orientales del cordón de la Ventana y junto con otros cursos constituyen la cabecera de la cuenca. Ingresa al valle interserrano recibiendo afluentes del cordón de las Tunas y Pillahuincó por su margen izquierda y de cordón de la Ventana por la derecha. Con dirección nornoroeste-sursureste desemboca en el dique Paso de las Piedras. En este lugar el caudal es de 4,5 m³/seg. A partir de allí, con el caudal regulado, continua

por la llanura recibiendo muy pocos afluentes. En su cuenca alta posee 21 subcuencas que drenan al cauce principal y una de las más importantes es la del arroyo

San Bernardo que nace en el cerro tres picos (1230 m) y confluye en cercanías de la localidad turística de Sierra de la Ventana (Fig. 1).

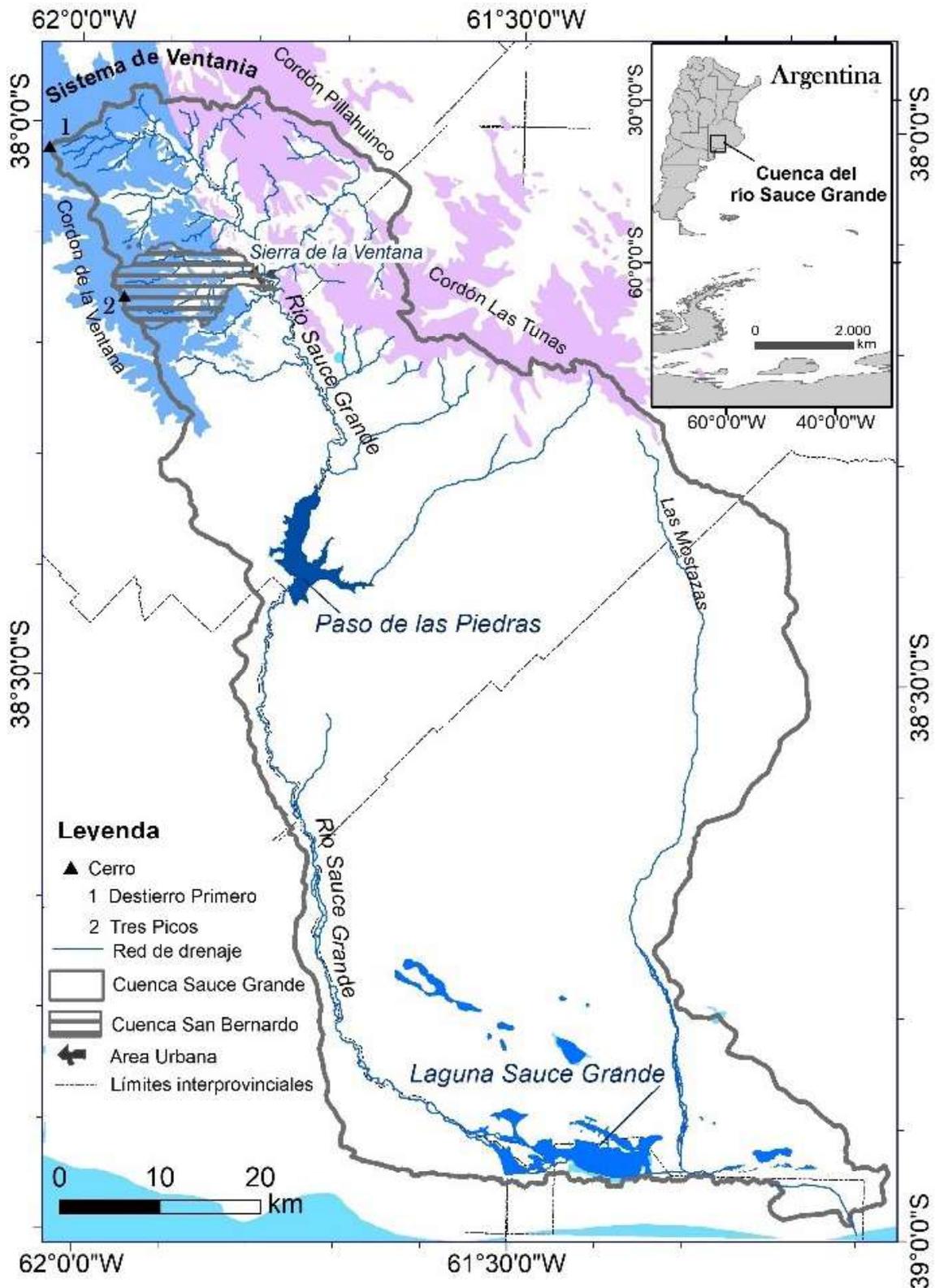


Figura 1 - Área de estudio. Fuente: elaboración propia

La cuenca del arroyo San Bernardo (82 km²) presenta dos zonas geológicas importantes: 1) el área de afloramientos rocosos y 2) la correspondiente a las acumulaciones eólicas-aluviales. El área 1 está compuesta por afloramientos pertenecientes al Grupo Ventana (Segundo ciclo sedimentario - Andreis *et al.*, 1989) y al grupo Pillahuincó (Tercer ciclo sedimentario - Andreis *et al.*, 1989). Las estructuras predominantes en la cuenca son los pliegues y las fracturas (Suero, 1972 y Sellés Martínez, 2001) y estas controlan la red de drenaje. En algunos sectores se destacan hogbacks y crestas, ambas relacionadas con el ángulo de inclinación de los bancos que forman los flancos de los pliegues y con la erosión diferencial de los mismos. El área 2 está compuesta por sedimentos de origen eólico y fluvial. Su origen, según Zabala y Quattrocchio (2001), se debe a que, a lo largo de la historia geológica, actuaron como zonas geomorfológicamente deprimidas en los largos períodos secos. En estos períodos de ausencia de actividad fluvial en el sistema principal, estas zonas deprimidas fueron rellenadas por acumulaciones fluviales efímeras y eólicas, con desarrollo de suelos que actualmente se encuentran con un uso agrícola-ganadero y que posteriormente fueron incididas por la red de drenaje más actual.

Climáticamente, el área está comprendida en la franja de climas templados, con veranos e inviernos bien marcados y primaveras y otoños moderados. En esta zona donde existe una alternancia permanente de masas de aire de distinta índole, la característica esencial es la variabilidad en las condiciones de tiempo, hecho que se pone de manifiesto en todas las estaciones del año (Campo de Ferreras *et al.*, 2004). La característica distintiva de esta región es la variabilidad temporal y espacial de la precipitación. A su vez, la ocurrencia de las precipitaciones también se ve influenciada por fenómenos meteorológicos a escala global los cuales contribuyen a las fluctuaciones periódicas en el monto de las lluvias (Deschamps *et al.*, 2003; Zapperi *et al.*, 2006; Zapperi *et al.*, 2007; Gil *et al.*, 2008; Ferreli y Aliaga, 2015).

Materiales y métodos

El trazado y jerarquización de la red de drenaje (Strahler, 1974) se realizó a partir de la carta topográfica 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del mosaico de imágenes Google Earth® con una escala cartográfica 1:1.400 (altura de ojo de 3 km). La digitalización y posterior análisis se realizó con el software ArcGis®. La pendiente media de la cuenca se calculó en ArcGis® a partir de un modelo digital elaborado con las curvas de nivel digitalizadas a escala 1:50.000 y con equidistancia de 10 metros. La elección de las escalas y del material cartográfico estuvo fundamentada en que 1) la escala 1:50.000 es la cartografía base oficial del área de estudio con mayor nivel de detalle, 2) la posibilidad de comparación de los resultados con cuencas próximas del área para esta escala, 3) cambiar el nivel de detalle al máximo posible para llegar a la realidad de trazado de la red de drenaje y definir un umbral mínimo de trabajo. De esta forma se pudieron digitalizar cauces y distinguir procesos geomorfológicos que no estuvieran contemplados en la escala mayor.

El cauce principal se definió siguiendo el criterio topográfico (Senciales González, 1999) que considera la máxima diferencia de cotas dentro de la cuenca. Los parámetros e índices morfométricos (Fig. 2) 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 para la región en particular (Gil, 2010; Gentili, 2012; Scavonne *et al.*, 2015; Gil *et al.*, 2016; Volonté, 2017, Moretto *et al.*, 2018). Estos se organizaron en 5 grupos: 1) vinculados con la forma y tamaño de la cuenca; 2) vinculados con el relieve; 3) vinculados con la topología y la longitud de la red de drenaje y 4) vinculados con la intensidad del drenaje concentrado. Con respecto al grupo 1, para el cálculo de la relación de elongación, que indica la forma de la cuenca, y se lo define como la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área que la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma (Schumm, 1963; Sala y Gay, 1981; Díez Herrero, 2001).



Figura 2 - Índices y parámetros morfométricos calculados. Entre paréntesis se indica el autor. Fuente: elaboración propia

Resultados

Características morfológicas generales

Según Senciales González (1999) uno de los caracteres cualitativos más importantes de una cuenca son los patrones de drenaje asociados a características climáticas, litológicas y/o estructurales. La cuenca del arroyo San Bernardo posee un patrón subdendrítico según la clasificación de Howard (1967). Esto se debe a que el trazado de la red de drenaje de la cuenca alta posee control estructural dada por la presencia de fracturas asociadas a la estructura de plegamiento característico de estas sierras (Harrington, 1947) (Fig. 3).

Por otra parte, el cauce principal de la cuenca posee un diseño en planta que refleja las características litológicas y morfológicas por donde discurre. En la cuenca alta presenta un evidente control estructural donde predominan los cambios bruscos de dirección siguiendo en algunos casos líneas de fracturas. En la cuenca media el cauce deja las sierras y discurre sobre le

pedemonte serrano. En este tramo, posee características de diseño *braided* debido principalmente al cambio de pendiente y sustrato. En un tercer tramo el arroyo describe un conjunto continuo y regular de meandros con una dirección predominante SO-NO (Volonté, 2017).

El cauce principal de la cuenca nace en el cerro Tres Picos (1.239 m s.n.m) y desemboca en el río Sauce Grande. La jerarquía de la red de drenaje fue de orden 5, valor que se mantuvo en ambas escalas de trabajo. Las variaciones se presentaron principalmente en los primeros órdenes, lo cual se puede observar en la tabla 1. En la escala 1:1.400 se identificaron y contabilizaron 383 cauces de los cuales el 78 % corresponden al primer orden mientras que en la escala 1:50.000 se contabilizaron 207 cauces de los cuales el 75% correspondientes al total de los cauces. La diferencia en la cantidad cauces de orden 1 tiene que ver con el nivel de detalle de la escala seleccionada. Si se analizan los porcentajes se puede observar que no varían las proporciones con respecto a la cantidad de cauces de los diferentes órdenes.

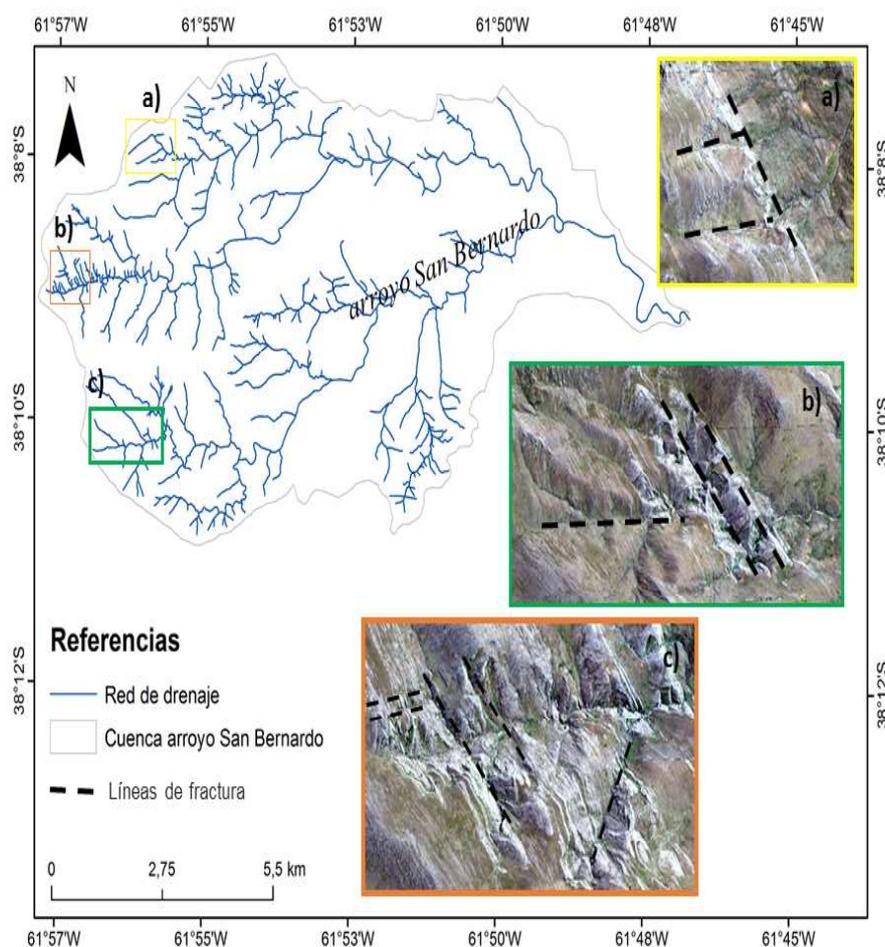


Figura 3. Red de drenaje y dependencia estructural en la cuenca alta. Fuente: elaboración propia

Tabla 1: Número de segmentos de cauces de los diferentes órdenes jerárquicos para ambas escalas Fuente: Elaboración propia

Orden	1	2	3	4	5	Total
Cuenca San Bernardo (1:1.400)	299 (78%)	66 (17%)	13 (3%)	4 (1%)	1 (1%)	383
Cuenca San Bernardo (1: 50.000)	155 (75%)	40 (19%)	8 (4%)	3 (1%)	1 (1%)	207

Análisis morfométrico de la red de drenaje en ambas escalas

Parámetros de tamaño y relieve de la cuenca

Los parámetros vinculados a las variables de tamaño y relieve son reconocidos por ser de medición directa, es decir, que se obtienen de mediciones efectuadas en los documentos cartográficos base. Algunos brindan información por sí solos y otros constituyen parámetros para el cálculo de nuevos índices (Jardí, 1985; Gentili, 2012). Además de los parámetros obtenidos de la jerarquización de los cauces (número de orden y longitud de los segmentos) se obtuvieron los parámetros: Área de la cuenca (82 km²), Perímetro (45,7 km), Longitud del cauce principal (20,9 km), Altura máxima (1239 m), Altura mínima, 250 m), Altura media (474,5 m), Desnivel absoluto (989 m), Pendiente media de la cuenca (8,4°) y Pendiente media del cauce principal (49,1°). Para estos parámetros, el uso de diferentes escalas no modifica los resultados finales. En el caso del perímetro, el aumento de escala puede generar un cambio en la rugosidad del trazado dependiendo de la topografía del lugar. Sin embargo, en este caso ambos trazados coincidieron.

Según Chow *et al.* (1994) el área de una cuenca es un parámetro importante debido a que ante la existencia de iguales condiciones de alimentación por precipitaciones su tamaño tendrá incidencia en el volumen de agua recibida. De esta manera actúa como un potenciador de los procesos erosivos y de la generación de crecidas en los cauces para evacuar el agua y sedimento. La cuenca del arroyo San Bernardo (82 km²) es considerada como una cuenca chica según la clasificación establecida por (Chow *et al.*, 1994). Se desarrolla sobre alturas

que varían entre los 250 m s.n.m (altura mínima) a 1.239 m s.n.m (altura máxima- cerro Tres Picos). La diferencia entre estas dos alturas extremas definen un desnivel de 989 m el cual sugiere pendientes favorables a la génesis y activación de procesos erosivos y de transporte de materiales (Volonté, 2017). Sin embargo, las pendientes mayores se encuentran en el sector oeste de la cuenca y las menores en el este (Fig. 4). Esto se puede comprobar si se observa el perfil longitudinal del cauce principal que representa las condiciones topográficas de la cuenca en general. Así, por encima de los 500 m s.n.m existe un predominio de procesos erosivos y por debajo de este se desarrollan más los procesos de transporte y depositación.

Los valores de área, perímetro y desnivel de la cuenca permiten suponer menores tiempos de concentración de la escorrentía superficial y mayor susceptibilidad a experimentar crecidas con hidrogramas de picos pronunciados y corta duración (Jardí, 1985; Senciales González, 1999, Díez Herrero *et al.*, 2008; Méndez *et al.*, 2015). Las crecidas en el arroyo San Bernardo ocurren cuando las precipitaciones son intensas y concentradas en un corto lapso de tiempo. Casado *et al.* (2017) y Volonté (2018) determinaron el Hidrograma Unitario Sintético (HUS) para un evento de 82 mm registrados en la cuenca baja en un intervalo de tiempo de dos horas. La curva mostró que el tiempo de crecida fue de 2 horas con un caudal pico de 461 m³/s, el tiempo de concentración de 3 horas demorando un total de 8 horas en volver al caudal normal. Estos resultados se relacionan con la pendiente de la cuenca que es superior a 27° en la zona de nacientes y la escasa infiltración que poseen los afloramientos rocosos. Esto provoca una alta velocidad y concentración de las aguas en este sector. Esta situación se amortigua en la zona de la llanura aluvial donde la pendiente es menor.

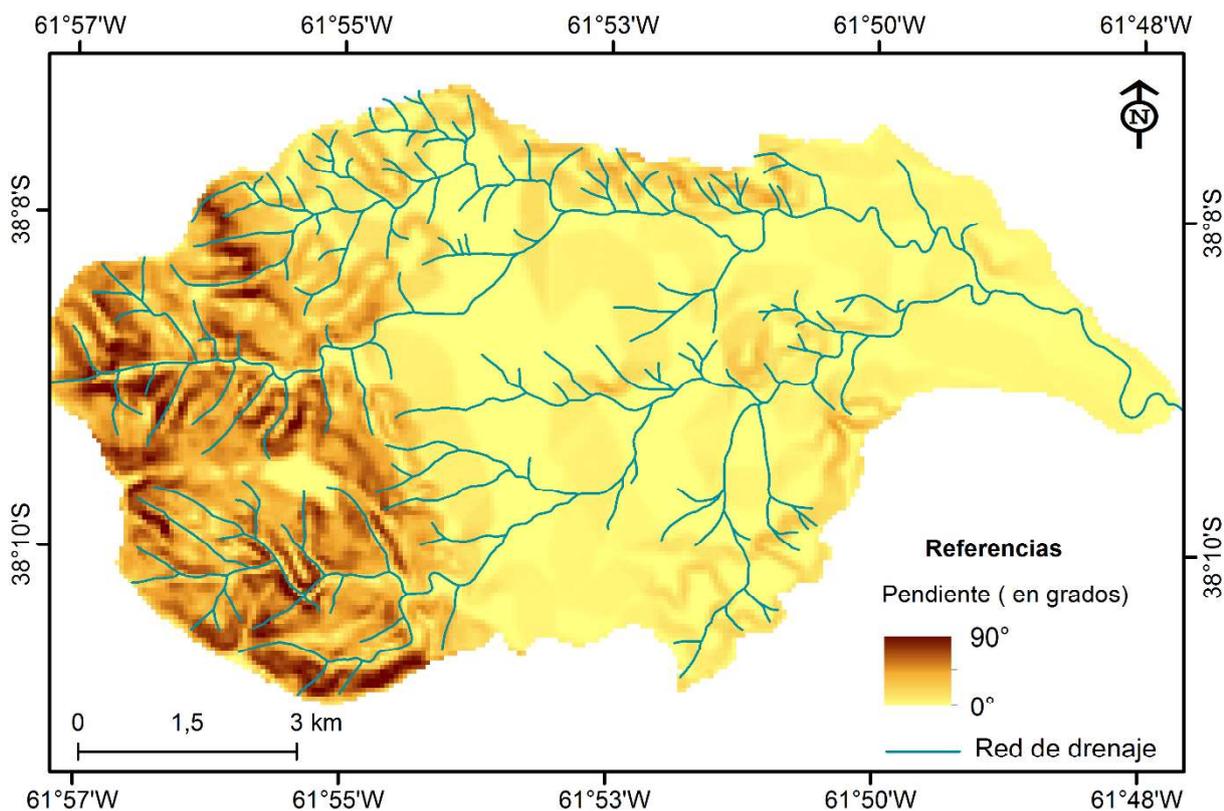


Figura 4 - Mapa de pendiente de la cuenca del arroyo San Bernardo. Fuente: elaboración propia

Según Senciales González (1999) el escurrimiento superficial genera erosión que se traduce en un transporte de material a través de los canales según su jerarquía. Esta jerarquización dependerá, entre otros factores, de la litología la cual tiene un rol importante en el tamaño y forma de la cuenca (Quiroga et al., 2014; Esper Angillieri et al., 2016). Según Jardí (1958) materiales blandos darán formas redondeadas, mientras que materiales más duros darán formas más quebradas o lobuladas.

Índices vinculados a las variables tamaño y forma

La Razón de elongación (R_e) es un índice que está en relación con la forma de la cuenca. La R_e atiende a la relación entre el área y el cauce principal al cual drena. El valor de elongación obtenido para la cuenca del arroyo San Bernardo es 0,47 (1:1.400) y 0,50 (1: 50.000) e indica que la cuenca presenta una forma más bien alargada. De modo general, se puede inferir la potencial respuesta hidrológica de la cuenca en función del valor obtenido. Se considera que las cuencas con valores bajos presentan un claro retardo en la concentración de la escorrentía a causa de la longitud del cauce principal y con ello mayor

brusquedad de la crecida una vez concentrada el agua. Según Senciales González (1999), el retardo en la concentración puede variar en función de factores adicionales como la pendiente, la superficie de drenaje o el control estructural de cada cuenca. En este caso el valor tiene un rango medio y debe ser analizado junto con otros índices para complementar las afirmaciones en relación al comportamiento hidrológico sugerido. En este caso el R_e varía poco de una escala a la otra y se mantiene en el rango de cuencas elongadas. La longitud del cauce principal y el área no presentan variaciones importantes por ello no afecta en gran medida la variación de este índice.

Índices vinculados con las variables del relieve

La pendiente media de la cuenca es de 15,8 % (8,7°) con un desvío estándar de 16,2% (9,4°). Este valor es alto si se lo compara con cuencas del área serrana (Gil, 2010) como, por ejemplo: la del arroyo del Oro (6,3°), la de El Negro (3,9°) o la de El Zorro (2,1°). La pendiente media del curso principal es útil a fines interpretativos y clasificatorios porque incide directamente en la velocidad del agua en el cauce y de

esta forma condiciona su energía cinética y su potencia erosiva. En el caso del arroyo San Bernardo, la pendiente del cauce principal es 4,68 %. Este valor medio, en la cuenca de estudio, es poco representativo debido a que existe un desnivel marcado entre el comienzo del

cauce principal y la zona del piedemonte mientras que entre este último punto y la desembocadura en el río Sauce Grande las pendientes son menores (Fig. 5). Se sugiere que este parámetro sea interpretado junto con el resto de los parámetros e índices analizados.

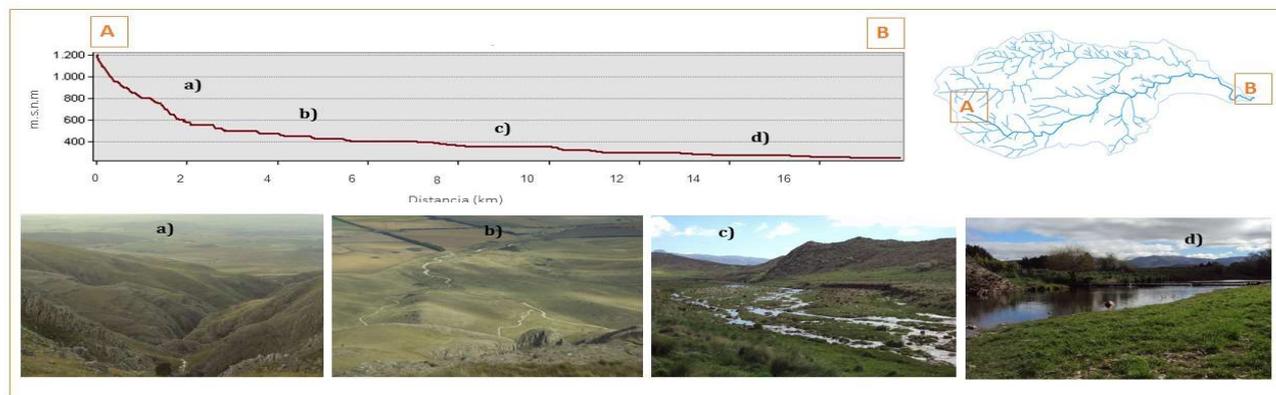


Figura 5 - Perfil longitudinal del curso principal. Fuente: elaboración propia.

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 caudal y mayor capacidad erosiva (Schumm, 1963). El resultado obtenido fue 0,04 coincidente para ambas escalas.

La Relación de Relieve (R) es la relación entre el desnivel absoluto de la cuenca y el perímetro de la misma (Melton, 1957). El valor obtenido para la cuenca es 0,02 en ambas escalas. Una razón de relieve alta implica mayor desnivel, mayor velocidad del agua y por ende mayor capacidad de erosión. Según Gisbert Gallego (2001) 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.

Los parámetros e índices vinculados al relieve no poseen variación de una escala a la otra ya que no dependen del trazado de la red de drenaje. La variación puede surgir en la pendiente del cauce principal debido al trazado más detallado (escalas menores) de los cauces de órdenes superiores comienzan a mayor altura o se alargan.

Índices vinculados con las variables topológicas y de longitud

Se entiende por 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, 1974). 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. 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 otra parte, según Senciales González (1999) 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. En el caso de la cuenca analizada la R_b promedio es 4,21 (1:1.400) y 3,64 (1:50.000) ambos se encuentran en el rango característico de los sistemas fluviales de zonas montañosas pero sin demasiado control estructural (tabla 2). El valor obtenido con la escala de mayor detalle se asemeja a los obtenido por otros autores en cuencas del sistema serrano a una escala de detalle como por ejemplo Scavonne *et al.* (2015) para la subcuenca del arroyo Ventana ($r_b=4,05$).

Del análisis de la relación de bifurcación entre los distintos órdenes se observa que entre el orden 1-2 la diferencia es considerable dado que la cantidad de cursos 1 digitalizada en la escala de mayor detalle fue mayor. En el orden 2-3 las relaciones son semejante lo cual no sucede entre el orden 3-4. Estos valores

indican que la red de drenaje se encuentra, en general, bien jerarquizada. Sin embargo, existen anomalías que se traducen en la dinámica hídrica entre los cursos de orden 2 y los de orden 3, lo cual responde a cambios en la litología. Esto fue comprobado por Gil (2010) para subcuencas cercanas con similar control lito-estructural.

Tabla 2: Relación de bifurcación entre los distintos órdenes de la cuenca. Fuente: elaboración propia.

R_b	$R_b(1-2)$	$R_b(2-3)$	$R_b(3-4)$	$R_b(4-5)$	Valor medio
$R_{b(1:1.400)}$	4,53	5,08	3,25	4	4,21
$R_{b(1:50.000)}$	3,88	5	2,67	3	3,64

La Relación de Longitud (R_l) es definida por Horton (1945) como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior (Senciales González 1999; Gil, 2010). En general los cauces que presentan mayores longitudes suelen estar situados en áreas de fuertes pendientes. Los valores medios oscilan entre 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 cuenca estudiada el valor medio obtenido es 2,71 para la escala 1:1.400 y 2,18 para la escala 1:50.000. (Tabla 3). Según Sala y Gay (1981), la existencia de distintos valores en la R_l entre segmentos de diferentes órdenes se interpreta como indicio de dos etapas erosivas en una misma cuenca que, en este caso puede deberse a la

configuración litológica y topográfica de la cuenca. A su vez, altas R_l revelan una concentración paulatina de caudales a lo largo del colector principal, mientras que bajas relaciones muestran mayor energía concentrada bruscamente.

Las variaciones surgidas en los índices que relacionan ordenes consecutivos analizados se pueden justificar en el hecho del aumento de la cantidad de numero de segmentos de órdenes superiores y la longitud de los mismos. Que estos, responde a un cambio de escala pero que el resultado vinculado a la configuración litológica y topográfica de la cuenca de estudio. La mayor escala refuerza variaciones entre órdenes consecutivos en ambos índices lo cual permite una mejor interpretación de los mismos. Cuando se observan los valores medios de cada índice las diferencias se generan en el orden de los decimales.

Tabla 3: Valores de la Relación de longitud. Fuente: elaboración propia

	$R_l(2-1)$	$R_l(3-2)$	$R_l(4-3)$	$R_l(5-4)$	Media
$R_{l(1:1.400)}$	2,33	2,04	4,47	2,01	2,71
$R_{l(1:50.000)}$	1,26	2,89	3,14	1,45	2,18

Índices vinculados con las variables de la intensidad del drenaje concentrado

La Densidad de drenaje (Dd) es uno de los índices más ampliamente utilizados porque se vincula al estado erosivo de la red de drenaje. Según Horton (1945) un área con alta densidad de drenaje posee mayor superficie ocupada por canales de drenaje reservando una superfi-

cie de dimensiones variables para conducir con mayor velocidad el caudal generado por el agua de escorrentía. El valor obtenido para la cuenca analizada es 2,36 km/km² (1:1.400) y 1,93 km/km² (1:50.000). Según la clasificación de Strahler (1974) este valor corresponde a bajas densidades de drenaje o texturas gruesas, caracterizadas por materiales duros y baja infiltración como, en este caso, las cuarcitas.

La Frecuencia de drenaje de los cauces elementales (Fd_1) es la relación existente entre el número de cauces de primer orden y el área de la cuenca. Se expresa en número de cauces por kilómetro cuadrado. 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 cuenca fue 3,64 (1: 1.400) y 1,89 (1:50.000). Es importante remarcar que la base sobre la cual se realizó la jerarquización y posterior análisis morfométrico fue a escala 1:1.400 lo que permitió mayor nivel de detalle al momento de digitalizar los órdenes uno.

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). Existe una clara correlación entre la densidad de drenaje y este coeficiente, por lo cual se puede afirmar que a mayor Dd, mayor será la torrencialidad de la cuenca. Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad (Pons Martí y Soriano Soto, 1994). Los cauces de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de crecidas repentinas. En la cuenca el Ct es 8,6 cauces/km² (1:1.400) y 3,65 cauces/km² (1:50.000) lo cual indica una alta torrencialidad y probabilidad de crecidas espontáneas. Los índices calculados muestran variación en sus resultados ya que toman en cuenta la red de drenaje que, como se mencionó anteriormente la cantidad y longitud de cada orden cambia al aumentar el detalle de la escala utilizada.

Conclusiones

La necesidad de obtener metodologías de estudios de la dinámica fluvial y el peligro de crecidas en pequeñas cuencas serranas o de montañas sin estaciones de medición significa un desafío. Por ello, el análisis morfométrico surge como una posibilidad de aproximación al comportamiento fluvial. Surge aquí la importancia de la elección de la escala de trabajo antes de comenzar los cálculos. Teóricamente, los estudios morfométricos son precisos trabajando con escalas hasta 1:50.000 cuando las cuencas poseen áreas grandes. Pero si el análisis se realiza con cuencas pequeñas es prudente mejorar la escala de análisis para aproximar los resultados a la

situación real. Más aún si las cuencas de análisis poseen un comportamiento torrencial que afecta a sectores poblados. En este caso de estudio, el uso de mayor detalle permitió mejorar los resultados en índices influenciados por las propiedades de la red de drenaje. Sin embargo, los índices vinculados al relieve no poseen variación de una escala a la otra ya que, como mencionamos anteriormente, no dependen del trazado de la red de drenaje. La variación puede surgir en la pendiente del cauce principal debido al trazado más detallado (escalas menores) de los cauces de órdenes superiores comienzan a mayor altura o se alargan.

Por otra parte, en el caso de la cuenca del arroyo San Bernardo la consideración conjunta de los índices y parámetros calculados permiten concluir de manera cualitativa que, ante la ocurrencia de eventos de precipitación torrencial, la potencialidad de que se generen crecidas es alta. Los índices que justifican esta afirmación son los de Rb y Re (la topología y forma respectivamente) y los índices Dd y Ct (de intensidad de la escorrentía concentrada).

Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló en el marco de los siguientes proyectos de investigación: “*Geografía Física aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas a diferentes escalas tiempo-espaciales*”, financiado por la SGCyT (24/G078) y dirigido por la Dra. Alicia M. Campo y “*Riesgo de inundación asociado a eventos hidrometeorológicos en cuencas de vertientes opuestas del cordón Sierra de la Ventana*”. Financiado por AGENCIA – FONCyT (2016/2751) y dirigido por la Dra. Verónica Gil.

Referencias Bibliográficas

- ANDREIS, R., IÑIGUEZ, A., LLUCH, J. y RODRÍGUEZ, S. (1989). Cuenca paleozoica de Ventania, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. En: Chebli, G. y Spalletti, L. (Eds.). **Cuencas Sedimentarias Argentinas**. Instituto Superior de Correlación Geológica San Miguel de Tucumán: p. 265-298.
- BAJABAA, S., MASOUD, M., AL- AMRI, N. Flash flood hazard mapping base on quantitative hydrology, geomorphology and gis techniques (case study of Wadi al Lith, Saudi Arabia). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, p. 2469 - 2481, 2013.
- CAMPO DE FERRERAS, A., CAPELLI DE STEFFENS, A.

- y DIEZ, P. **El clima del Suroeste bonaerense**. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, 2004. 105p.
- CASADO, A., GIL, V., VOLONTÉ, A. y CAMPO A. Modelos Digitales de Elevación (MDE) e hidromorfometría para el modelado de crecidas en pequeñas cuencas torrenciales no aforadas, arroyo San Bernardo, Argentina. En: **Libro Geotecnologías en los procesos ambientales**. Ed. EdiUNS, Argentina, Bahía Blanca, 2017, p. 123 – 136.
- CHOW, V., MAIDMENT, D., MAYS, L. **Hidrología aplicada**. Ed. McGraw-Hill: Bogotá, 1994. 584p.
- DESCHAMPS, J. R.; OTERO, O.; TONNI, E. P. **Cambio climático en la pampa bonaerense: las precipitaciones desde los siglos XVIII al XX**. Documento de Trabajo N° 109. Buenos Aires: Universidad de Belgrano, 2003. Recuperado de http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/109_deschamps.pdf
- DÍEZ HERRERO A. **Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y S.I.G. para la gestión de riveras**. Tesis (Doctorado en Geodinámica). Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, Madrid. 2001. 610p.
- DÍEZ HERRERO, A., LAÍN HUERTA, L. y LLORENTE ISIDRO, M. **Mapa de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración**. España: Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 2008. 190p.
- ESPER ANGIILLIERI, M. Y., ESPEJO, K., LARA, G., PERUCCA, L., y ROTHIS, M. 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**, v. 73, n. 4, p. 513-519, 2016.
- GARRY G.; BALLAIS J. y MASSON, M. La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v.8, n. 1, p. 5-15, 2002.
- GENTILI, J. **Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de inundaciones y anegamientos. Bahía Blanca, Argentina**. Tesis doctorado en Geografía. Departamento de Geografía, Universidad Nacional del Sur. 2012. 150p.
- GIL, V. **Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas**. Tesis (Doctorado en Geografía). Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. 2010. 269p.
- GIL, V.; GENTILI, J.O; ZAPPERI, P.A. CASADO, A.L.; CAMPO, A.M. Aspectos geomorfológicos e hidrometeorológicos en cuencas serranas, Suroeste de la provincia de Buenos Aires. En: **Utilización de tecnología, SIG GIS DAY**, Bahía Blanca. 2008. p. 26-38.
- GISBERT GALLEGU, J.M. **Caracterización hidrológica y de los procesos erosivos en la cabecera del río Monachil (Granada)**. Tesis (Doctorado en Ciencias Geológicas). Universidad de Granada. 2001. 198p.
- GÓMEZ, R. D., GASPARI, F. J., y GEORGIEFF, S. M. Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. **Acta geológica lilloana**, v. 29, n.1, p. 3-19, 2017.
- GRECU, F. Index of morphohydrographic basin completion by perimeters and areas. Case study in Romania. **Geografía física e dinámica quaternaria**. Italia: Comitato Glaciologico Italiano, vol.31, pp. 37-75. 2008.
- HARRINGTON, H. 1947. **Explicación de las hojas geológicas 33m y 34m Sierra de Curamalal y de la Ventana. Provincia de Buenos Aires**. Buenos Aires: Ministerio de Industria y Minería. 43 pp.
- HORTON, R. Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphologie. **Geol, Soc. Amer.**, n. 56, p. 275-370. 1945.
- HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a simulation. Bulletin of the Americas Association of Petroleum Geologist. Estados Unidos: **American Association of Petroleum Geologists**, n. 51, p. 2246-2259. 1967
- IBISATE GONZÁLEZ DE MATAUCO, A. 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**, n. 38, p. 311 – 329. 2004.
- JARDÍ, M. 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, v. 19, p. 41-68, 1985.
- KNIGHTON, D. **Fluvial Forms and Processes**. A new perspective. Londres: Arnold. 1998.
- LELIEVRE, M., BÉLANGER, T. y MORNEAU, F. L'approche hidrogéomorphologique pour la cartographie des zones á risque d'inodation dans les vallées de petites et moyennes tailles: un exemple commenté pour la vallée de la rivière au renard. In proceedings of the **4 th Canadian Conference on Geohazards: From causes to management**. p. 594. 2008.
- LEOPOLD, L. B., GORDON WOLMAN, M. y MILLER, J.P., **Fluvial Processes in Geomorphology**. Dover Publication. 1995.

- MAGESH, N.S.; JITHESHLAL, K.V., CHANDRASEKAR, N., JINI, K.V. Geographical information system based morphometric analysis of Bharathapuzma River Basin, Kerala, India. **Applied Water Science**, v. 2, p. 467-477, 2013.
- MELTON, M. A. An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology. **Office naval research. Geography Branch, Technical reports** n. 11, 1957.
- MÉNDEZ W., PACHECO, H., CARTAYA, S.; MACARANO, A y LEÓN, C. Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. **Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.**, Volumen 24, Número 2, 2015. 133-156.
- MEZA, J. R. Y., TORRES, R. J. P., y Chacón, S. A. Q. 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**, v.2, n.2, p. 60-69, 2018.
- MORETTO, B., GENTILI, J.O. y CAMPO, A. M. Morfometría fluvial: análisis multiescalar preliminar en subcuencas del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina). **Acta de resumen: Jornadas de jóvenes investigadores AUGM**. 2018. p. 1
- MORISAWA, M. **Rivers. Form and Process**. Virginia: Ed. Longman. 1986. 390 p.
- MUNICIPALIDAD DE TORNQUIST. **Plan de Ordenamiento Territorial de la Comarca de la Sierra de la Ventana. Partido de Tornquist**. 2002. 241 p.
- OLCINA CANTOS, J. y DÍEZ-HERRERO, A. Cartografía de inundaciones en España. **Estudios Geográficos**, v. 78, p. 283-315, 2017.
- PONS MARTÍ, V. y SORIANO SOTO, M. Valores del coeficiente de torrencialidad R: Su cálculo y distribución para la provincia de Castellón. **Cuadernos de Geografía**, v.55, p. 17 – 25, 1994.
- QUIROGA, D.; GIL, V. y CORONATO, A. Morfometría de la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina. Aportes al conocimiento de las condiciones de escurrimiento en territorios semiáridos; **AEQUA; Cuaternario y Geomorfología**; v. 28, n. 1-2, p. 61-78. 2014
- SALA, M. y GAY, R. Algunos datos morfométricos de la cuenca de Isábena, **Notes de Geografía Física**. Department of Geografía, Universitat de Barcelona, Barcelona, n. 4, p. 41–65, 1981.
- SCAVONE, A.S.; GENTILI, J.O.; GIL, V. Índices morfométricos aplicados al análisis de crecidas. Arroyo de la Ventana, Argentina. En: **Jornadas de Geotecnologías del Sur Argentino**. 2015. p. 478 – 487.
- SCHOMWANDT, D., LUCIONI, N., y ANDRADE, M. I. Cartografía de riesgo de inundación y la representación de la vulnerabilidad en Gran La Plata, Buenos Aires. **Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente**, v. 36, p. 15-28, 2018.
- SCHUMM, S. The evolution of drainage system and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. **Bulletin of the Geological Society of America**, Vol. 67, 597-645, 1956.
- SCHUMM, S. 1963. **A Tentative Classification of Alluvial River Channels**. Circular 477. Washington: Geological Survey, 16 pp.
- SELLÉS MARTÍNEZ, J. Geología de la Ventania. Provincia de Buenos Aires, Argentina. **Journal of Iberian Geology**, n. 27, p. 43-69, 2001.
- SENCIALES GONZÁLEZ, J.M. **Redes fluviales. Metodología de análisis**. Universidad de Málaga: España, 1999. 337p.
- STRAHLER, A. N. **Geografía Física**. Barcelona: Omega, 1974. 767 p.
- SUERO, A. **Geological compilation of Sierras Australes (Buenos Aires Province, Argentina)**. Buenos Aires: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), 11p. 1972.
- THOMAS, J.; JOSEPH, S.; THRIVIKRAMJI, K.P; ABE, G y KANNAN, N. Morphometrical analysis of two tropical mountain river basin of contrasting environmental setting, the Southern Western Ghats, India. **Environmental Earth Science**, n. 6, p. 2353-2366, 2012.
- TRICART, J. L. **Geomorfología de la Pampa Deprimida como base para estudios edafológicos y agronómicos**. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, colección científica: Buenos Aires, 1973. 202p.
- VOLONTÉ, A. **Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina**. Tesis (Doctorado en Geografía). Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. 2017. 160p.
- ZAPPERI, P., CASADO, A., GIL, V., y CAMPO, A. Caracterización de las precipitaciones invernales en el Suroeste bonaerense. **IV Jornadas Interdisciplinarias del Sudoeste Bonaerense**. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur. 2006.
- ZAPPERI, P.; RAMOS, M.; GIL, V. y CAMPO, A. Caracterización

de las precipitaciones estivales en el Suroeste bonaerense.

Contribuciones Científicas, n.1 p. 483 – 491, 2007.

ZABALA, C. y QUATTROCCHIO, M. Estratigrafía y evolución

geológica del río Sauce Grande (Cuaternario), provincia de

Buenos Aires, Argentina. **Revista de la Asociación Geológica**

Argentina, v. 56, n.1, p. 25 – 37, 2001.