

25. Medio Ambiente

Morfometría fluvial: análisis multiescalar preliminar en subcuencas del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina)

Moretto, Belén¹; Gentili, Jorge^{1,2}; Campo, Alicia M.^{1,2}

belen.moretto@uns.edu.ar; jogentili@uns.edu.ar; amcampo@uns.edu.ar

Departamento de Geografía y Turismo

¹Universidad Nacional del Sur - ²CONICET

Código de campo cambiado

Código de campo cambiado

Código de campo cambiado

Resumen

Las cuencas de los arroyos Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Lolén, pertenecientes a la cuenca del arroyo Sauce Corto (vertiente norte del Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires, Argentina) son afectadas recurrentemente por eventos extremos de precipitación que generan crecidas y dan lugar a inundaciones que afectan el desarrollo socio-económico en el partido de Coronel Suárez. Las cuencas objeto de estudio son no aforadas y para el estudio del peligro de inundación es necesario el análisis de parámetros e índices morfométricos que permitan inferir su respuesta hidrológica. Es por ello que el objetivo del trabajo es identificar las diferencias, en términos cualitativos y cuantitativos, entre parámetros e índices morfométricos obtenidos a partir de distintas fuentes de datos y escalas y analizar sus implicancias en la interpretación de la respuesta hidrológica de las cuencas de interés. Se midieron y calcularon parámetros e índices morfométricos a partir de cartas topográficas a escala 1:50.000 e imágenes satelitales de escala 1:2.000. Los resultados presentados en formato tabular y cartográfico se evaluaron en términos cualitativos y cuantitativos. Desde un punto de vista cualitativo, el aumento de la escala y el uso de una imagen como fuente de datos permitió representar de forma más precisa los tramos de las redes de drenaje y en consecuencia aproximarse más a sus dimensiones reales. En términos cuantitativos, en los 4 índices calculados el aumento de la escala de trabajo, disminuyó la subestimación de la respuesta hidrológica. En relación con la respuesta hidrológica de las cuencas, los resultados permiten inferir que la potencialidad para generar crecidas e inundaciones son mayores.

Palabras clave: Morfometría fluvial, crecidas, inundaciones, Sauce Corto, Coronel Suárez

Introducción

Para el estudio de la dinámica de cuencas hidrográficas no aforadas es fundamental el análisis morfométrico. A través del estudio de parámetros e índices morfométricos es posible interpretar la dinámica geomorfológica y la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica. Según Strahler (1964) la morfometría es la medida de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial. La importancia de dicho análisis radica en que permite comprender los elementos básicos y definir el grado de evolución de dicho sistema y por ende el estado erosivo en el que se encuentra (Senciales Gonzalez, 1999).

Existen una gran variedad de trabajos teórico-metodológicos clásicos sobre índices y parámetros morfométricos. Horton (1945) abordó los primeros modelos cuantitativos para estudiar la dinámica fluvial. Su trabajo fue retomado y a su vez modificado por autores tradicionales en la temática como Schumm (1956), Strahler (1964), Gregory y Walling (1973), Jardí (1985), Romero Díaz y Lopez Bermudez (1987) y Senciales Gonzalez (1999).

A nivel internacional los índices morfométricos continúan siendo ampliamente aplicados al estudio del comportamiento hidrológico de cuencas: Díez Herrero (2004), Dash *et al.* (2013), Lama *et al.* (2015), Chougale Sujit y Sapkale Jagdish (2017)

En el continente americano, entre los trabajos en materia de análisis morfométrico cabe citar a Cruz Romero *et al.* (2015), Mendez *et al.* (2015), Ramírez García *et al.* (2016), Ramírez Granados y Alfaro Jiménez (2017), entre otros.

En el territorio nacional, las mayores aplicaciones en la temática se desarrollan en cuencas de montaña y serranas: Doffo y González Bonorino (2005), Mesa (2006), Esper Angillieri (2012), Esper Angillieri y Perucca (2014), Esper Angillieri *et al.* (2016), Díaz Gómez *et al.* (2017).

En el sistema de Ventania, cabe mencionar a Gil (2010) para el análisis morfométrico de la cuenca alta del río Sauce Grande; Gentili (2012) para la cuenca del río Sauce Corto. Por otra parte Gil *et al.* (2009) evaluaron la influencia de la litología, estructura y morfología en índices morfométricos para subcuencas del río Sauce Grande y el arroyo Sauce Corto y Gil *et al.* (2016) evaluaron la potencialidad para generar crecidas a partir de la combinación de índices morfométricos en las cuencas altas del río Sauce Grande y el arroyo Sauce Corto.

En las cuencas de los arroyos Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Lolén, pertenecientes a la cuenca del arroyo Sauce Corto (vertiente norte del Sistema de Ventania), ocurren eventos de precipitaciones extremas que generan crecidas y dan lugar a inundaciones. Estos eventos provocan daños a las poblaciones de Santa María, Santa Trinidad, San José y Coronel Suárez, y

afectan a las personas, al normal desarrollo de sus actividades y a las infraestructuras. Las subcuencas objeto de estudio son no aforadas y para un estudio del peligro de inundación es necesario el análisis de paramentos e índices morfométricos que permitan inferir su respuesta hidrológica.

Para el análisis morfométrico, el uso de determinadas escalas se encuentra en función de la superficie de la cuenca (Jardí, 1985). En cuencas con una superficie de 5.000 km² se suele utilizar mapas a escala de 1:50.000, a medida que la superficie disminuye la escala a utilizar debe ser mayor.

Las cuencas Nacimiento Oeste, Nacimiento Este y Lolén presentan superficies menores a lo expuesto, siendo Lolén la de mayor superficie (18,95 km²). La única fuente de datos altimétricos de la superficie de cobertura continua en el Sistema de Ventania son las cartas topográficas a escala 1:50.000, insuficientes para un adecuado análisis de la morfometría fluvial de las cuencas bajo estudio. Por esta razón, resulta de utilidad la evaluación de parámetros e índices morfométricos a partir de productos de mayor escala. De esta forma será posible evaluar los cambios en los valores obtenidos y como repercuten en la peligrosidad para generar crecidas según las diferentes escalas de trabajo. El conocimiento del comportamiento hidrológico de las cuencas ante la ocurrencia de eventos extremos de

precipitación, constituye una herramienta para la gestión del riesgo, en concordancia con los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (United Nations General Assembly, 2015).

Área de estudio

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

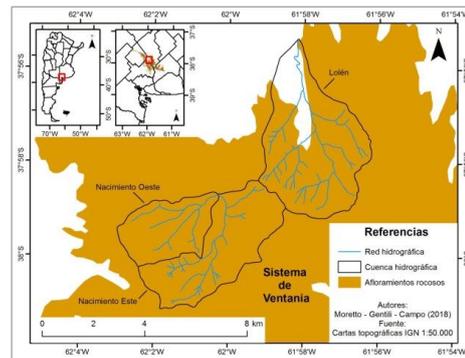
El suroeste bonaerense está comprendido en la faja planetaria de climas templados con veranos e inviernos bien marcados y primaveras y otoños moderados. Se presentan variaciones espaciales en las temperaturas y en las precipitaciones con una estacionalidad térmica marcada, con una temperatura media anual que oscila entre 14 °C y 20 °C (Campo *et al.*, 2004). El sistema serrano actúa como una divisoria de aguas y produce una sobreexcitación orográfica de las precipitaciones del orden de los 110 mm (Casado *et al.*, 2007). La disposición de las laderas genera un cambio en la cantidad y en el comportamiento de las precipitaciones generando una gran variabilidad espacial de las precipitaciones dentro del valle interserrano (Gentili y Gil, 2013). Como forma de precipitación dominan las lluvias y las nieves no se dan todos los años (Gil, 2011).

Desde el punto de vista geológico, en el área de estudio predominan afloramientos rocosos, en donde los suelos presentan

escaso desarrollo. No obstante, el sector inferior de las microcuencas de interés se encuentra cubierta de depósitos eólicos principalmente loésicos de diferentes eventos de depositación y en donde son frecuentes los sectores sin cobertura vegetal ni edáfica (Pereyra y Ferrer, 1995). Los arroyos antes mencionados discurren sobre litologías del Devónico inferior correspondientes al grupo Ventana (formación Lolén, formación Providencia y formación Napostá). La primera de ellas compuesta de areniscas de granos finos a mediano, grises, verdosos, parduscos y amarillentos, la Fm. Providencia formada por ortocuarcitas rojizas a rosadas y la Fm. Napostá constituida por ortocuarcitas muy homogéneas de grano fino a muy fino, maciza y densas (Harrington, 1947). Desde el punto de vista geomorfológico, en la vertiente norte del Sistema de Ventania el proceso dominante de modelado tanto en el pasado como en la actualidad es el fluvial. En la actualidad el reptaje de suelos y el escurrimiento difuso constituyen los procesos geomórficos más activos. La depositación y erosión eólica han jugado un importante papel en la configuración de la red fluvial, siendo uno de los factores de su diseño (Pereyra y Ferrer, 1995). Suelen ser frecuentes los paleocauces, las planicies de inundación y los abanicos aluviales producto de la acción fluvial y la remoción en masa. La vegetación original predominante del área es la estepa de gramíneas (Cabrera, 1976). En la actualidad, debido al uso

intensivo del hombre de la tierra, la agricultura y ganadería se constituyen como las actividades económicas por excelencia.

Figura 1. Área de estudio.



Objetivo

Identificar las diferencias, en términos cualitativos y cuantitativos, entre parámetros e índices morfométricos obtenidos a partir de distintas fuentes de datos y escalas, y analizar sus implicancias en la interpretación de la respuesta hidrológica de las cuencas de interés.

Materiales y Métodos

Para el análisis morfométrico multiescalar de las cuencas del arroyo Sauce Corto se utilizaron dos escalas: 1:50.000 y 1:2.000 (aproximada) de distintas fuentes de datos. Para la escala 1:50.000 se emplearon las cartas topográficas Sierra de las Tunas, Estancia Gran Chaco, Tornquist y Sierra de la Ventana del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las tres primeras con equidistancia de 10 metros y la última de ellas de 25 metros. Para la escala 1:2.000 se trabajó a partir

de imágenes satelitales de Google Earth Pro®.

Se vectorizaron la red hidrográfica de ambas fuentes de datos y las curvas de nivel y los puntos acotados de las cartas topográficas. Se delimitaron las cuencas hidrográficas. A partir de dichos datos se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) mediante el interpolador *Topo to Raster*, provisto por ArcGIS 10®. La fuente de datos cartográfica y el interpolador utilizados (corregidos con fines hidrológicos que permite incluir además de las curvas de nivel, líneas de drenaje, puntos acotados, depresiones y superficies cubiertas de agua) resultan los más apropiados en cuanto a precisión y representación del relieve del Sistema de Ventania (Casado *et al.* 2010; Campo *et al.*, 2016).

A partir de los datos descriptos se jerarquizaron las redes de drenaje. Para la jerarquización se asignó a cada segmento de cauce un número de orden según la metodología propuesta por Strahler (1964). Luego se obtuvieron los parámetros de medición directa: área, perímetro pendiente media de la cuenca, longitud del cauce principal, cota máxima y cota mínima (Tabla I). Para la determinación del cauce principal de la red de drenaje se consideraron los criterios topográfico y de longitud. Según el primero de ellos, el cauce principal es aquel cuya cabecera alcanza el punto más elevado y según el criterio de longitud, el cauce principal es el aquel que se

encuentra más alejado del nivel de base. Se seleccionaron estos criterios para la determinación del cauce principal debido a que el desnivel de una cuenca y la longitud de sus cauces tiene incidencia directa en el comportamiento hidrológico de la misma y por tanto en la propagación de crecidas. Es preciso observar que el valor que suele obtenerse de la medición de la longitud del cauce principal acarrea un error directamente proporcional a la pendiente sobre la que se desarrolla (Senciales González, 1999).

Tabla I. Parámetros morfométricos.

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

En relación con los índices morfométricos, se calcularon: Relación de Bifurcación (Rb), Relación de Longitud (RI), Densidad de Drenaje (Dd) y Razón de Elongación (Re) (Tabla II). A partir del análisis conjunto de dichos índices es posible realizar una mejor interpretación de la respuesta hidrológica de cuencas no aforadas y mediante la comparación de los resultados de cada cuenca, valorar en términos relativos su peligrosidad

asociada a la potencialidad para generar crecidas (Senciales González, 1999; Gil, 2010; Gentili, 2012, Gil *et al.*, 2016). Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos de los parámetros e índices a ambas escalas se realizó una comparación cuali-cuantitativa para la identificación de las variaciones de los índices asociadas al aumento de la escala.

Tabla II. Índices morfométricos.

Índice	Fórmula	Significado
Relación de Bifurcación (Rb)	$Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	N_u = Número de cauces de orden "u" N_{u+1} = Número de cauces del orden inmediato superior a "u"
Relación de Longitud (Rl)	$Rl = \frac{L_u}{L_{u-1}}$	L_u = Longitud media de cauces de orden "u" L_{u-1} = Longitud media de cauce del orden inferior
Densidad de Drenaje (Dd)	$D = \frac{\sum L_k}{A_k}$	$\sum L_k$ = Suma de la longitud total (km) de los cauces de todos los órdenes A_k = Área total de la cuenca (km^2)
Razón de Elongación (Re)	$Re = \frac{1,129\sqrt{A}}{L_{max}}$	A = Área de la cuenca L_{max} = Longitud del cauce principal

Resultados y Discusión

Jerarquización y tipología de las redes de drenaje

La jerarquización de los tramos de cauce que conforman la red hidrográfica permite

identificar unidades de diagnóstico y realizar el análisis morfométrico. Las cuencas Lolén y Nacimiento Oeste a ambas escalas de trabajo no presentan variaciones en cuanto al orden jerárquico de su red de drenaje. La cuenca Nacimiento Este, a escala 1:50.000 posee un orden jerárquico de 4 y a escala 1:2.000 un orden de 3 (Tabla III). Para esta cuenca, con dominancia de afloramientos rocosos y con escasa superficie bajo desarrollo agrícola (caso en que los cursos de agua podrían ser modificados por las recurrentes actividades de labranza) es posible inferir algún error en la representación de la red hidrográfica del documento más antiguo.

Tabla III. Frecuencia según orden y jerarquía de la red de hidrográfica.

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

En las tres cuencas, las diferencias de jerarquización se inician en los tramos de cursos de orden 1 y se trasladan hacia los órdenes mayores. En relación con los tramos de cauce de orden 1, se observa que el cambio de escala implica un elevado crecimiento de su frecuencia. Se verificaron aumentos del 48 %, 85 % y 78

% para Lolén, Nacimiento Oeste y Nacimiento Este respectivamente. En la dos últimas cuencas, la diferencia es debida a que los cursos de orden 1 son de corta extensión y considerando el límite de error gráfico, a escala 1:50.000 no es posible indicarlos. Los resultados del análisis multiescalar evidencian el peso de los procesos de generalización cartográfica asociados a la escala de semidetalle (1:50.000) y en términos del análisis de la respuesta hidrológica es posible inferir que el uso de la escala (1:50.000) puede llevar a la subestimación de la torrencialidad de las cuencas y por ende de su peligrosidad.

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

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

(Harrington, 1947) en pendientes suaves (Fig. 3). La red de drenaje de las cuencas Nacimiento Oeste y Nacimiento Este, a diferencia de la cuenca de Lolén, evolucionan en áreas de mayores pendientes (Fig. 3). Nacimiento Oeste presenta una tipología paralela (Fig. 2), se encuentra sobre áreas de fuertes pendientes, que condiciona trazados rectilíneos (Senciales González, 1999). Al igual que Nacimiento Este discurren sobre Formación Napostá y Providencia, lo cual es un factor condicionante de la tipología de sus redes de drenaje. Nacimiento Este presenta una red subdendrítica (Fig. 2), con trazados angulados que pueden atribuirse a contactos litológicos (Gentili, 2012). La facilidad de identificación de la tipología de drenaje, desde un punto de vista cualitativo, no es uniforme respecto a la escala. Para la cuenca Lolén, la escala más representativa resultó ser la de mayor detalle mientras que en las restantes cuencas la escala 1:50.000 fue la más adecuada ya que las generalizaciones asociadas a la misma permiten esquematizar la tipología.

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

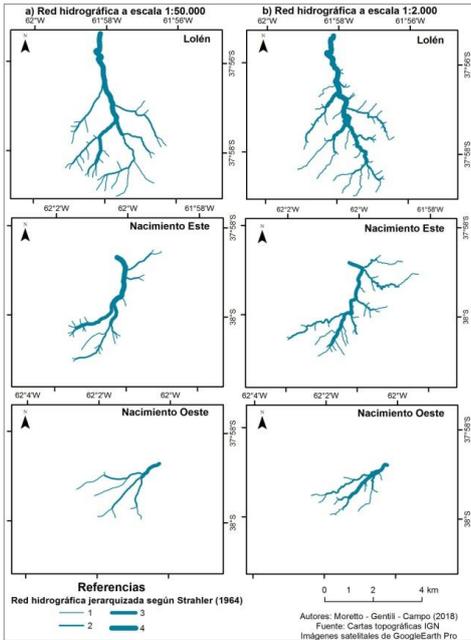
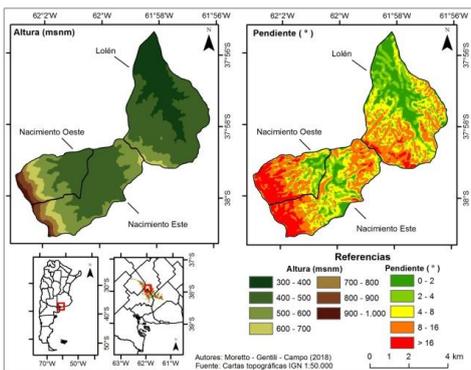


Figura 3. Mapas a) altimétrico y b) de gradiente de pendientes.



Morfometría Fluvial

Los parámetros morfométricos se adquieren de la medición directa de las cartas topográficas base. El área de una

cuenca es un parámetro de gran interés debido que a partir de él se pueden calcular índices morfométricos de relevancia para determinar el estado erosivo de las cuencas y establecer una clasificación en cuanto a su tamaño (Jardí, 1985; Chow *et al.*, 1994). El tamaño de la cuenca tendrá incidencia en el volumen de agua recibida y por ende en la consecuente generación de procesos erosivos y de crecidas (Bruniard, 1992). La cuenca Lolén es la de mayor superficie con 18,95 km² (Tabla IV). Cabe destacar que para el cálculo del área de las cuencas, la superficie fue tomada de la delimitación de las cuencas a escala 1:50.000. El perímetro de una cuenca está vinculado con el área ya que es directamente proporcional (Jardí, 1985); y de él se derivan otros índices (Tabla IV). La pendiente media es de importancia ya que incide en la velocidad del caudal, condiciona la energía cinética y la consecuente erosividad a lo largo del cauce (Senciales González, 1999). Para definir los rangos de pendiente de las cuencas se utilizó la clasificación propuesta por Van Zuidam (1985) acotada a 5 clases de acuerdo a las características del sector de estudio (Fig. 3). Las cotas máximas y mínimas son parámetros utilizados para el cálculo del desnivel. Nacimiento Oeste y Este poseen una pendiente media 11,83 ° y 8,85 ° respectivamente (moderadamente escarpada). Ambas presentan cota máxima similar e igual cota mínima ya que

confluyen en el mismo punto (Tabla IV). Lolén presenta una pendiente media de 5,85 ° con un desnivel considerablemente menor que las cuencas anteriores (276 m). Las diferencias de desnivel entre las cuencas configura una peligrosidad diferente en cada una de ellas. Para las cuencas Nacimiento Oeste y Nacimiento Este, las altas pendientes medias contribuyen a la activación de procesos erosivos como consecuencia del poder de arrastre de la escorrentía y una mayor potencialidad de generar crecidas.

Tabla IV. Parámetros morfométricos.

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

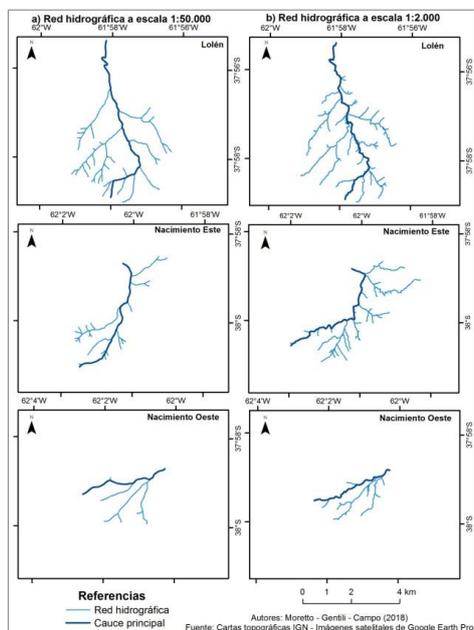
La longitud del cauce principal incide en el comportamiento hídrico de las cuencas. Para Nacimiento Oeste y Nacimiento Este en ambas escalas el curso principal coincide siguiendo el criterio de longitud y el criterio topográfico, es decir que el cauce principal definido es aquel que posee mayor longitud y cuya cabecera alcanza la máxima altura (Tabla V; Fig. 4). Por el contrario, para la cuenca del arroyo Lolén a escala 1:50.000 no hubo coincidencia en los criterios seleccionados para la identificación del cauce principal. En este caso se consideró el criterio por el cual su cabecera alcanza la cota más alta, debido a su incidencia en la determinación de la velocidad del agua. En términos cualitativos, Lolén y Nacimiento Oeste

presentan similitud en la sucesión de tramos que conforman el curso principal, situación que no se verifica para Nacimiento Este. Esto último puede atribuirse a los cambios observados en la configuración de la red de drenaje y consecuentemente en su jerarquización (Tabla III; Fig. 2). En términos cuantitativos, las diferencias de longitud del cauce principal no son grandes entre ambas escalas, siendo siempre mayores los cauces a escala 1:2.000: Lolén (0,69 km), Nacimiento Oeste: 0,06 km y Nacimiento Este (0,63 km). Las mayores diferencias se obtienen en las cuencas donde el curso principal discurre mayormente por zonas de baja pendiente, asociado esto a la minimización del error por subestimación de la longitud de cauces en sectores de fuerte desnivel.

Tabla V. Criterio de selección de cauce principal.

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

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



Se denomina Relación de bifurcación (Rb) a la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden dado y los del orden inmediato superior (Strahler, 1964). En cuanto a los índices obtenidos, valores próximos a 2 revelan áreas de escaso relieve, valores típicos de entre 3 y 5 para los sistemas fluviales (en cuencas donde la estructura geológica no distorsiona el patrón de drenaje natural) y valores superiores a 5 y sobre todo a 10 indican una fuerte dependencia estructural (Strahler, 1964; Senciales González, 1999). A escala 1:50.000, la relación de bifurcación (Rb) media para las cuencas presentan valores cercanos a 3 (Tabla VI), típicos de los sistemas fluviales. Para la escala 1:2.000, los valores medios de Rb

son levemente mayores en las cuencas Lolén y Nacimiento Oeste, manteniéndose en el rango típico de los sistemas fluviales. Por el contrario, Nacimiento Este presenta un valor de Rb medio superior a 5. El elevado valor de Nacimiento Este permite inferir una rápida concentración de las aguas en los cursos y por ende crecidas súbitas potenciadas por los elevados gradientes de las pendientes. Lo indicado refuerza lo observado por Gentili (2012) y Gil *et al.* (2016) para esta cuenca.

Tabla VI. Relación de bifurcación y Relación de longitud.

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

La razón de longitud (RI) se define como la proporción existente entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y la de los segmentos del orden inmediato inferior. Los valores medios que suelen obtenerse oscilan entre 1,5 para cuencas en las que se produce un leve incremento de la longitud de los cauces y 3 para aquellas cuencas en las cuales sus órdenes superiores poseen grandes longitudes (Senciales González, 1999). Los valores medios para las tres cuencas (Tabla VI) son inferiores a 1,5, indicando leve incremento de la longitud de los cauces entre ordenes sucesivos y mayor energía concentrada en los cauces

principales. Esto último se refuerza con los valores obtenidos en la escala mayor. La densidad de drenaje (Dd) se define como el cociente de la longitud total de las redes de drenaje de una cuenca y el área de la misma. Los valores obtenidos a ambas escalas de trabajo son inferiores a 10 (Tabla VII), indicando baja densidad de drenaje y textura gruesa (Strahler, 1964). Para la escala 1:2.000, los valores del parámetro son mayores respecto a los de la escala 1:50.000. Nuevamente se refleja la incidencia de la escala en la longitud de los tramos de cauce. El incremento del índice con la escala indica una fuerte incidencia de la escorrentía concentrada y refuerza la inferencia de crecidas bruscas realizada por (Gentili, 2012).

Tabla VII. Densidad de drenaje y Relación de Elongación.

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

La Razón de elongación (Re) es la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área que la de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma. Valores inferiores a 1 indican cuencas con una forma más alargada y valores cercanos a 1 se asemejan a una forma más circular (Schumm, 1956). El análisis multiescalar permite observar que los valores del índice decrecen levemente con el aumento de la longitud de los tramos de

cauce a escala 1:2.000. Nacimiento Oeste mantiene su forma con tendencia a la circularidad, mientras que Lolén y Nacimiento Oeste acrecientan su tendencia a ser cuencas elongadas.

Conclusiones

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

En relación con la jerarquización de la red de drenaje se registraron aumentos considerables de tramos de cauce, principalmente de orden 1. Esto permitió inferir que a la escala de 1:50.000 se subestiman en gran medida la torrencialidad de las cuencas.

Respecto de la tipología de la red de drenaje, su facilidad de identificación no es uniforme respecto a la escala.

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

En términos cuantitativos, quedó reflejado en los 4 índices calculados que el aumento de la escala de trabajo, disminuyó la subestimación de la respuesta hidrológica. En relación con la

respuesta hidrológica de la cuencas, los resultados no solo confirman los estudios previos sino que permitieron inferir que la potencialidad para generar crecidas e inundaciones es mayor.

Bibliografía

- Bruniard, E. D. (1992). *Hidrografía Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. San Isidro, Argentina: CEYNE.
- Cabrera, M. (1976). *Territorios fitogeográficos de la República Argentina*. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo II, Fascículo 1. Buenos Aires, Argentina: Acme SACI.
- Campo de Ferreras, A., Capelli de Stefens, A. y Diez, P. (2004). *El clima del Suroeste bonaerense*. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo.
- Campo, A. M., Gentili, J. y Silva, A. M. (2016). Comparación de DEM generados a partir de distintas fuentes de datos. Cuenca del arroyo Sauce Corto, sistema de Ventania, Argentina. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 8 (8), 34-55.
- Casado, A., Gentili, J., Campo, A. M. y Peiry J-L. (2010). Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. Acta en: *Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino*. Capitulo nº 10. Bahía Blanca, Argentina: Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.
- Casado, A. L., Gil, V. y Campo, A. M. (2007). Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario. *Revista Huellas*, (11), 9-26. Recuperado de: <http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/huellas/n11a02casado.pdf>
- Chougale, S. S. y Sapkale J. B. (2017). Morphometric Analysis of Kadvi River basin, Maharashtra Using Geospatial Techniques. *Current World Environment*, 12 (3), 635-645. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/320555763_Morphometric_Analysis_of_Kadvi_River_Basin_Maharashtra_Using_Geospatial_Techniques
- Chorley, R. J. (1969). The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. En Chorley, R. J. (Ed.), *Intorduction to fluvial processes*. Londres, Gran Bretaña: Methuen.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogota, Colombia: McGraw-Hill.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría A. M., Carrillo González, F. M. y Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (64) ,26-34. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/674/67441039004.pdf>
- Dash, P., Aggarwal, S. P. y Verma, N. (2013). Correlation based morphometric analysis to understand drainage basin

evolution: a case study of Sirsa river basin, western Himalaya, India. *Scientific annals of Alexandru Ioan Cuza*, 59 (1), 1-35. Recuperado de: http://www.analegeo.uaic.ro/index.php/SciGeo/article/view/223/pdf_4

Díaz Gómez, R., Gaspari, F. J. y Georgieff, S. M. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta geológica lilloana*, 29 (1), 3-19. Recuperado de: <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a01.pdf>

Díez Herrero, A. (2004). *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y S. I. G. para la gestión de riberas*. (Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Geodinámica, Madrid.

Doffo, N. y González Bonorino, G. 2005. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60 (1), 16-22. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v60n1/v60n1a03.pdf>

Esper Angillieri, M. Y. (2012). Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina: *Quaternary International*, (253), 74-79. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/251636489_Morphometric_characterization_of_the_Carrizal_basin_applied_to_the_e

valuation_of_flash_floods_hazard_San_Juan_Argentina/references.

Esper Angillieri, M. Y; Perucca, L. P. (2014). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (66), 235-245. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000200003&lng=es&tlng=es.

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. Recuperado de: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222016000400005&lng=es&tlng=es.

Gentili, J.O. (2012). *Hidrografía del Arroyo Sauce Corto aplicada al estudio de las inundaciones y anegamientos*. (Tesis de Doctorado en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

Gentill, J. y Gil, V. (2013). Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 22 (1-2), 147-166. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.ar/pdf/reuge/v22n2/v22n2a03.pdf>

Gil, V.; Gentili, J. y Campo, A. (2009). Influencia de la litología en la variación de los parámetros morfométricos, Sistema de Ventania, Argentina. *Papeles de Geografía*, (49-50), 55-68. Recuperado de: <https://digitum.um.es/xmlui/bitstream/10201/11537/1/05-GIL.pdf>

Gil, V. (2010). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. (Tesis de Doctorado en Geografía). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

Gil, V. (2011). Variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones. Cuenca alta del río Sauce Grande. En actas: *Congreso Nacional de Geografía, 72ª Semana de Geografía*. Mar del Plata, Argentina: Sociedad Argentina de Estudios Geográficos.

Gil, V., Gentili, J., Campo, A., Jelinski, G. y Crisafulli, M. (2016). Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires. En actas: *Tercer Encuentro de Investigaciones en Formación de Recursos Hídricos*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional del Agua.

Gregory, K. J. y Walling, D. E. (1973). *Drainage basin. Form and process: a geomorphological approach*. Londres, Gran Bretaña: Edward Arnold.

Harrington, H. (1947). *Explicación de las hojas geológicas 33 m y 34 m Sierra de*

Curamalal y de la Ventana, Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Industria y Minería.

Horton, R. (1945). Erosional development of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphologie. *Geological, Society of America*, (56), 275-370.

Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a simulation. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist*, (51), 2246 – 2259.

Jardi, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía, XIX*, 41-68. Recuperado de: <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45789/56812>.

Lama, T. D., Singh, R. K., Saikia, U. S. y K. K. Satapathy. (2015). Geomorphometric analysis of a hilly watershed in north east India. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 8 (1), 29-36. doi: 10.5958/2230-732X.2015.00004.2

Mendez Mata, W. J.; Córdova, J. R. y Ríos, S. J. C. (2015). Relaciones morfométrica-respuesta hidrológica en la microcuenca de denaje de la Quebrada Curutí (Estado Vargas, Venezuela), y su aplicación en la evaluación de la amenaza por inundaciones. Conference: XI Simpósio Brasileiro de Geografía Física Aplicada, Universidade de São Paulo, Departamento de Geografía, São Paulo, Brasil.

Mesa, L. M. (2006). Morphometric Analysis of a Subtropical Andean Basin

(Tucumán, Argentina). *Environmental Geology*, 50 (8), 1235-1242. doi: 10.1007/s00254-006-0297-y

Pereyra, F. y Ferrer, J. (1995). *Geomorfología del flanco nororiental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires*. En Actas IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Junin, Argentina. Ramírez García, A.G., Cruz León, A., Sánchez García, P. y Monterroso Riva, A.I. (2016). La caracterización morfométrica de la subcuenca del Río Moctezuma, Sonora: ejemplo de aplicación de los sistemas de información geográfica. *Revista de Geografía Agrícola*. (55), 27-43. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75749286003>.

Romero Diaz, M. y López Bermúdez, F. (1987). Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*. (12), 47-62. Recuperado de: http://gaia.geologia.uson.mx/academicos/choa/geomorfologia_2013/pdf/MORFOMETRIA%20DE%20REDES%20FLUVIALES.pdf.

Schumm, S. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in bad lands at Perth, Amboi, New Jersey. *Geol. Soc. Ame. Bull.* 67 (5), 597-646.

Senciales González, J. M. (1999). *Redes Fluviales, Metodología de Análisis*. España: Universidad de Málaga.

Strahler, A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and

channel networks. En: Chow, V.T. (Ed.) *Handbook of applied hydrology compendium of water-resources technology*. New York: McGraw- Hill Book Co.

United Nations General Assembly. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.

Van Zuidam, R. A. (1985). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Holanda: Smits Publishers, The Hague.

Financiamiento

PGI "La Geografía Física del Sur de la provincia de Buenos Aires. Relaciones del hombre y el medio natural" (24/G078). Dirección: Dra. Alicia M. Campo. Financiamiento: Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.