



Morfometría de la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina. Aportes al conocimiento de las condiciones de escurrimiento en territorios semiáridos.

*Morphometry of the Avilés river basin, Tierra del Fuego, Argentina.
Contribution to runoff knowledge in semiarid lands.*

Quiroga, D. ⁽¹⁾, Gil, V. ⁽²⁾, Coronato, A. ^(1,3)

- (1) Centro Austral de Investigaciones Científicas - CONICET. B. Houssay 200, 9410, Ushuaia, Argentina.
diegoquir@cadic-conicet.gob.ar
- (2) Departamento de Geografía y Turismo - Universidad Nacional del Sur- CONICET, San Juan 1198,
8000 Bahía Blanca, Argentina.
- (3) Instituto de Ciencias Polares, Recursos Naturales y Ambiente-Universidad Nacional de Tierra del Fuego.
Onas 450, 9410, Ushuaia, Argentina.

Resumen

Se analizan las características morfométricas de la cuenca de un río de la estepa semiárida de clima frío en la que los datos hídricos y meteorológicos son escasos. La obtención de los parámetros e índices ofrece una primera aproximación al conocimiento de la dinámica fluvial de la red de drenaje del río Avilés, en el norte de Tierra del Fuego, Argentina. Se utilizó una base cartográfica a escala 1:50.000 elaborada sobre un mosaico de imágenes Google Earth® y del modelo digital del terreno SRTM 90 (Shuttle Radar Topographic Mission). El procesamiento de la información se realizó sobre la plataforma SIG ArcGis 10®. Se digitalizaron todos los segmentos de cauce siguiendo la regla de la "V" topográfica y se jerarquizó cada uno según la metodología de Strahler (1964). Los índices de *Rr*, *R*, *Rb*, *Ish* y *Dd* caracterizan el contexto geológico-geomorfológico de la cuenca, mientras que *Rl*, *Re*, *If*, *Ct*, *C*, *Ca* permiten conocer el posible comportamiento del escurrimiento en dicho contexto. Los resultados presentados en este trabajo permiten inferir condiciones de escurrimiento y disponibilidad de agua en distintos sectores de la cuenca ante eventos de crecidas de distinto origen a pesar de la carencia de datos hidrológicos. Se aporta información de utilidad para el manejo del agua en los campos de ganadería extensiva de la región.

Palabras clave: morfometría, cuenca, disponibilidad de agua, río Avilés, Argentina.



Abstract

Morphometric characteristics of a river located in a semiarid cold steppe with few hydrological and meteorological data are analysed. Parameters and indices obtained offer an approach to the fluvial dynamics knowledge of the Avilés river basin in northern Tierra del Fuego, Argentina. A 1:50,000 base map was made using Google Earth® images and the SRTM 90 (Shuttle Radar Topographic Mission) terrain model. The data base was processed by ArcGis 10®. All the channel segments were digitalized, most of them following the vertex of the contour lines, and then were ordered by Strahler (1964) method. Geological and geomorphological basin characteristics are given by Rr , R , Rb , Ish y Dd index meanwhile runoff and water availability are offered by Rl , Re , If , Ct , C , Ca index. The results herein presented allow inferring possible runoff behaviour in the different parts of the basin although no hydrological data are available. The information would be also useful for water management in areas with extensive livestock raising.

Key words: morphometry, basin, water availability, Avilés river, Argentina.

1. Introducción

La morfometría fluvial proporciona información indirecta sobre la influencia que tiene la configuración geomorfológica en la dinámica de una cuenca hidrográfica. Horton (1945), Strahler (1952), Schumm (1956) y Morisawa (1962) fueron los primeros en establecer diferentes índices que cuantifican la relación entre las dimensiones topográficas de una cuenca con los procesos fluviales que allí se producen. Este análisis de las propiedades de los elementos que conforman la red de drenaje permite aproximarse de manera cuantitativa a la dinámica fluvial de una cuenca (Strahler, 1964). Los estudios de morfometría fluvial pueden ser abordados desde una óptica descriptiva, mediante la cual se clasifican los cauces según su forma y característica asociándolos con el sustrato geológico, o desde el punto de vista cuantitativo, con el que se comparan las redes de drenaje y se obtiene información respecto a las relaciones formaprocesos hidrológicos (Romero Díaz, 1989).

Desde sus comienzos, el análisis morfométrico ha sido usado para caracterizar las cuencas de drenaje, tal como se desprende de los trabajos de Gregory y Walling (1973), Gardiner (1975), Costa (1987); Leopold, *et al.* (1992); Moussa (2003), Sreedevi *et al.* (2005), Doffo y González Bonorino (2005); Mesa (2006),

Esper Angillieri (2008), Thomas *et al.* (2012). En los últimos años, el uso de tecnologías de información geográfica (TIG) permitió aplicar diferentes técnicas indirectas para obtener resultados más precisos de los índices morfométricos (Ozdemir y Bird, 2009; Magesh *et al.* 2013). Los datos altimétricos obtenidos in situ y los de manera indirecta, mediante el uso de modelos digitales, sumados a imágenes ópticas de alta resolución, permiten realizar cambios de escala reduciendo así el error cartográfico a la hora de extraer información digital. De esta manera, las características morfométricas de una cuenca pueden ser estudiadas con mayor precisión y sirven de base para cálculos de hidrogramas en cuencas carentes de datos hidrológicos, por ejemplo para el establecimiento del hidrograma unitario geomorfológico (García-Bartual, 1989). Este tipo de análisis adquiere gran importancia ya que permite una primera aproximación a la dinámica fluvial de redes de drenaje en las que los datos hidrométricos superficiales son escasos o ausentes. Tal es el caso de la mayoría de las cuencas hidrográficas de Tierra del Fuego, Argentina.

No hay disponibilidad de información hidrométrica para el área de estudio mientras que el registro de datos meteorológicos se circunscribe sólo a sectores representativos de la cuenca baja. Por estas razones, el conoci-

miento actual del funcionamiento del sistema hídrico es incipiente. El objetivo de este trabajo es analizar la morfometría de la cuenca y subcuencas hidrográficas del río Avilés. La actividad socioeconómica predominante en la cuenca es la ganadería ovina-bovina extensiva; su manejo se encuentra condicionado por la disponibilidad de agua en los distintos campos de pastoreo. La aplicación de los índices a las diferentes cuencas permitirá inferir las condiciones de escurrimiento y disponibilidad de agua para un manejo eficiente y sustentable de la misma para la actividad ganadera.

La cuenca del río Avilés se localiza entre los 53° 30' y 53° 40' de latitud Sur, en el norte de la provincia de Tierra del Fuego, Argentina. Tiene una superficie total de 156,7 km² de los cuales 33,5 km² pertenecen a la cuenca superior, que se encuentran en Chile (Figura 1B). Es una cuenca de tipo endorreica, con régimen hídrico pluvio-nival. Con una orientación O-E, el río es el único tributario del río Chico, uno de los principales cursos de agua permanentes de la estepa fueguina.

La conformación geológica de la cuenca es de rocas sedimentarias marinas marinas deltaicas de edad Mioceno medio (Formación Carmen Sylva), rocas sedimentarias proximales a continentales de edad Mioceno superior (Formación Castillo) y depósitos glaciares y fluvio-glaciares del Pleistoceno (Codignotto y Malumian, 1981; Bujalesky *et al.*, 2001, Olivero *et al.*, en prensa). Dichas rocas conforman las serranías de baja altura (345 a 100 m snm; Figura 1C) en el sector occidental; tienen cumbres sub-horizontales y rumbo general SO-NE, mientras que depósitos de till, que coronan estratos rocosos subhorizontales y planicies fluvio-glaciares de suave pendiente hacia el este, conforman los sectores central y oriental de la cuenca. Las mayores elevaciones se localizan en el sistema serrano ubicado en territorio chileno (Cerros del Bosque).

El clima de la región es Frío Subhúmedo Océánico caracterizado por una temperatura media anual menor a 10°C, un índice de aridez de 0,75 y un rango de temperatura media que

oscila entre 5°C y 10°C (Coronato *et al.*, 2008). Las temperaturas medias para los meses cálidos (enero/febrero) están entre los 9°C y 10°C y para los meses más fríos (julio/agosto) entre los 0°C y los -4°C. La mayor diferencia espacial de temperatura se da en el invierno y el gradiente térmico se acentúa hacia el oeste. Las precipitaciones medias anuales varían entre los 300 mm y 400 mm. El período noviembre-febrero es el menos lluvioso, con valores de 100 a 200 mm. Otro elemento climático a destacar es la nubosidad, la cual alcanza valores del 70% reduciéndose a 60% durante el período de invierno (Tuhkanen, 1992).

Un lugar representativo de este tipo climático es la ciudad de Río Grande, ubicada al sudeste de la desembocadura del río Avilés, donde la temperatura media es de 9,8°C y las precipitaciones medias anuales del orden de los 350 mm. En la estancia San Julio (Figura 1B), en cercanías a la cuenca media del río Avilés, se registran datos meteorológicos desde el año 2011 mediante una estación meteorológica automática. Los registros indican que la temperatura media del mes más frío (julio) es de 1,2°C mientras que la del mes más cálido (enero) es de 11,5°C. Los registros de precipitación anual oscilan entre 254 y 233 mm.

2. Metodología

El análisis morfométrico se realizó sobre una base cartográfica a escala 1:50.000 elaborada sobre un mosaico de imágenes extraídas de Google Earth®. La altimetría se obtuvo a través del modelo digital del terreno de 90 m de resolución espacial, SRTM 90 (Shuttle Radar Topographic Mission) procesado en un Sistema de Información Geográfico (SIG) y conformando un Modelo Digital del Terreno (MDT) del cual se extrajeron curvas de nivel con equidistancia 10 m. El sistema de referencia utilizada es el sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) faja 19 Sur y el datum es WGS84.

El procesamiento de toda la información se realizó sobre la plataforma SIG ArcGis 10®.

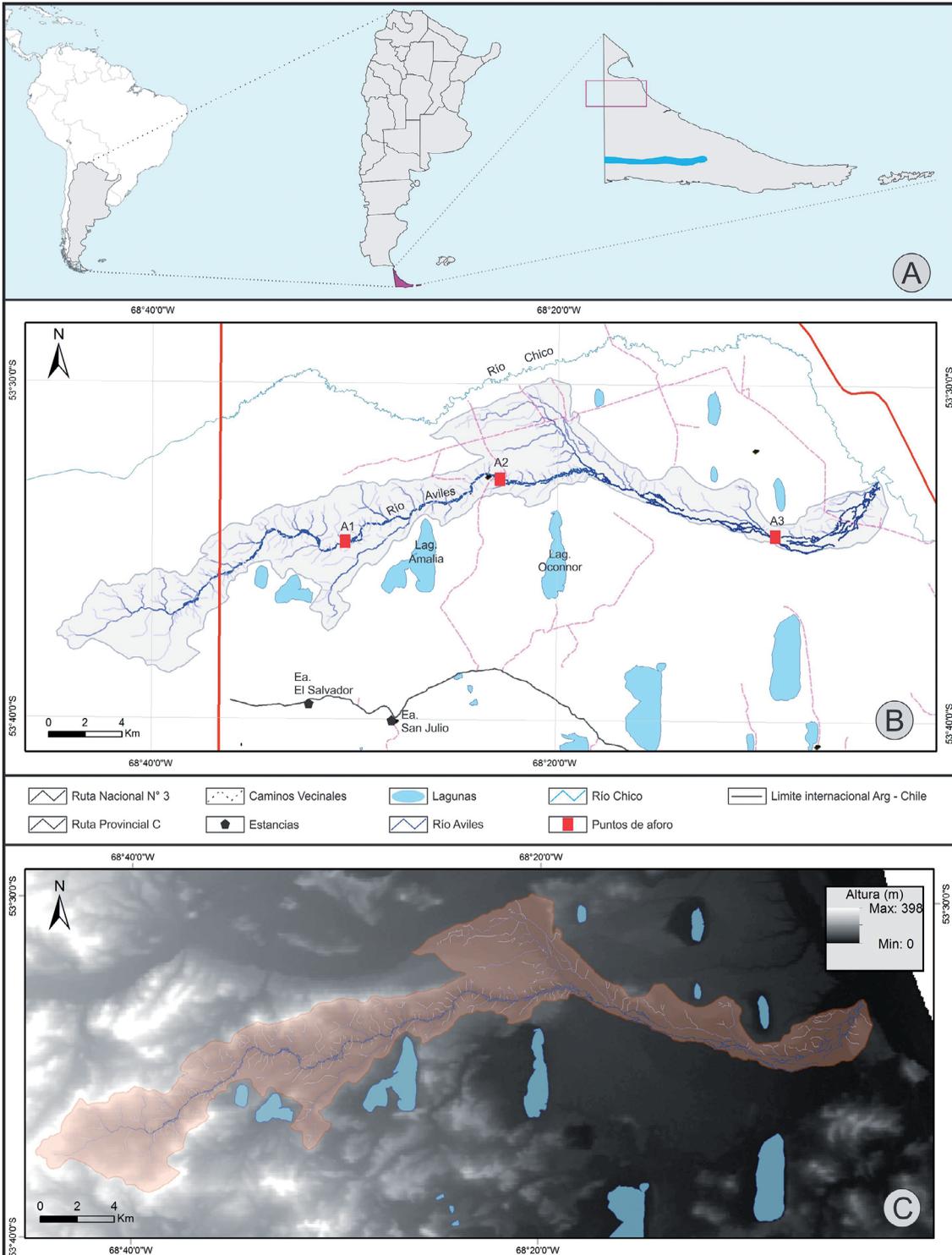


Figura 1: A) Posición relativa del área de estudio. B) Extensión de la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina. Ubicación de estaciones de aforo y de localidades mencionadas en el texto. C) Mapa altimétrico.
 Figure 1: A) Relative situation of the study área. B) Avilés river basin extent, Tierra del Fuego, Argentina. C) Altimetric map.

Se elaboró una base de datos cuantitativos para el posterior análisis morfométrico. 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). Se definió como cauce principal al de mayor longitud desde la desembocadura a las nacientes. En caso de presentarse dos cauces de igual orden de jerarquía, se optó por el segmento de mayor longitud. Una vez definido el curso principal, se delimitaron las subcuencas tributarias en ambos márgenes. El límite de la cuenca alta, media y baja se estableció a partir del perfil longitudinal del curso principal y de las características geomorfológicas de la cuenca. El perfil se elaboró mediante la herramienta 3D Analyst de ArcGis 10®.

Un primer análisis incluyó toda la cuenca del río Avilés, con el objetivo de obtener su caracterización general. Para adquirir información detallada de la dinámica fluvial en las diferentes subcuencas se realizó un cambio de escala de trabajo y se analizaron morfométricamente las subcuencas de orden jerárquico 3 y 4. Dado la inexistencia de toponimia, se identificaron las subcuencas con las siglas que corresponden al número de orden – subcuenca Avilés N° (ej: O3-SCA-5 = Orden 3 – Subcuenca Avilés 5). Se obtuvieron los diferentes parámetros y se aplicaron los índices propuestos por Strahler (1964), Horton (1945), Schumm (1956) y Mueller (1968) principalmente. Los mismos son: Razón de relieve – Relief ratio (Rr), Relación de relieve – Relief ratio (R), Razón de bifurcación – Bifurcation ratio (Rb), Razón de longitud – Stream length ratio (Rl), Sinuosidad hidráulica del curso principal – Channel index (Ish), Razón de elongación – Elongation ratio (Re), Densidad de drenaje – Drainage density (Dd), Índice de frecuencia – Frequency index (If), Coeficiente de torrencialidad – Drainage intensity (Ct), Coeficiente de almacenamiento – Channel-storage capacity (Ca) y Constante de mantenimiento del curso – Channel maintenance constant (Cm). El detalle de la aplicación de estos índices se presenta en el apartado de resultados. Los

diferentes parámetros e índices se agruparon según las variables a caracterizar (Tabla 1). Los parámetros son valores absolutos tales como: área, longitud, número de cursos, etc. Los índices son el resultado de la combinación de varios parámetros y en conjunto conforman las variables.

Para la obtención de los datos de caudal se utilizó el correntómetro digital TECMES Modelo TS 1001. A lo largo del curso principal se establecieron puntos de aforo representativos del sector medio y bajo de la cuenca (Figura 1B). La cuenca alta no pudo ser aforada debido a que la mayor parte de su extensión pertenece al territorio chileno y el tramo argentino es inaccesible. Para el cálculo del caudal se estableció la sección transversal midiendo la profundidad cada 0,50 cm de distancia y la velocidad de corriente a 0,5 de la profundidad total en cada punto de la sección, siguiendo la metodología de Chow *et al.* (1994).

3. Resultados

Los índices obtenidos se utilizan en la actualidad para establecer relaciones entre las geoformas y los procesos que actúan en una cuenca hidrográfica (Romero Díaz, 1989, Seniales González, 1999, Ciccacci *et al.*, 1992, Pareta y Pareta, 2011).

La cuenca alta del río Avilés se desarrolla en el sector occidental (Figura 2A), donde se encuentran las mayores elevaciones del terreno. Está conformada por las serranías bajas de rocas sedimentarias marinas, anteriormente descritas (Figura 3A). El curso principal que nace en este sector recibe afluentes por ambos márgenes y fluye con orientación SO-NE. Las subcuencas de mayor orden que aportan a éste lo hacen principalmente por la margen izquierda o septentrional (O3-SCA5, O3-SCA4, O3-SCA3, O3-SCA2) (Figura 2B). En este sector el cauce principal posee una pendiente media de 1,42%. La cuenca media se desarrolla a partir del primer cambio de gradiente del curso principal (Figuras 2A y 2C). A partir de aquí, el río discurre con una pendiente de

Variables de:	Parámetros	Índices (Fórmula)	Definición
Relieve	Altura máxima Altura mínima Altura media Desnivel absoluto Pendiente media de la cuenca Pendiente media del curso principal	Razón de relieve ($Rr = D/Lc$) Relación de relieve ($R = D/P$)	<i>D: Desnivel Absoluto</i> <i>Lc: Longitud de la cuenca</i> <i>P: Perímetro</i>
Topología y longitud de los cauces	Orden de la cuenca N° de cauces de orden u N° total de cauces Longitud de cauces de orden u Longitud del curso principal	Razón de bifurcación $Rb = Nu/Nu+1$ Razón de longitud $Rl = Lu/Lu-1$ Sinuosidad hidráulica del curso principal $Ish = l/Ld$	<i>Nu: Número de orden</i> <i>Lu: Longitud de los cursos de un orden dado</i> <i>l: Longitud del curso principal</i> <i>Ld: Longitud más corta entre el inicio y el final del curso</i>
Forma y tamaño de las cuencas	Área de la cuenca Perímetro Longitud de la cuenca	Razón de elongación $Re =$	<i>A: Área</i>
Intensidad fluvial		Densidad de drenaje $Dd = Lt/A$ Índice de frecuencia $If = N1/A$ Coeficiente de torrencialidad $CT = Dd * (N1/A)$ Coeficiente de almacenamiento $Ca = Rl/Rb$ Constante de mantenimiento del curso $Cm = l/Dd$	<i>Lt: longitud total de cursos</i> <i>N1: Número de cursos de orden 1</i> <i>Dd: Densidad de drenaje</i> <i>Rl: Razón de longitud</i> <i>Rb: Razón de bifurcación</i>

Tabla 1: Variables, parámetros e índices usados en la caracterización morfométrica de la cuenca del río Avilés.
Table 1: Variables, parameters and index used in the morphometric characterization of the Avilés river basin.

0,39% entre serranías bajas conformadas por rocas sedimentarias marinas en la margen izquierda y niveles de terrazas de diferente elevación, compuestas por depósitos glaciares y fluvio-glaciares en la margen opuesta (Figura 3B). En la cuenca media, los afluentes alcanzan el orden 4 y la mayoría tributa al río Avilés por su margen izquierda (O3-SCA8 y O3-SCA1). En este tramo del curso principal se obtuvieron dos mediciones de caudal representativos de los mínimos valores en la época estival; en invierno el río sufre congelamiento. Los valores fueron de 0,03 m³/s en el aforo 1 y 0,04 m³/s en el aforo 2 (Figura 1A). La diferencia tan pequeña entre ambos se debe a que entre un punto y otro tributan las dos cuencas de orden 3 que pertenecen a este sector medio. La cuenca baja comienza aguas abajo del aporte del tributario de orden 4 (Figura 2A). Se diferencia claramente el cambio de cuenca media a baja debido a:

que el río deja de tener aportes hídricos por la margen derecha o meridional, a un cambio de dirección NO-SE, y a que discurre sobre extensas planicies fluvio-glaciares de suave pendiente general (0,08%) hacia el este. La escasa diferencia de relieve torna difícil la identificación y trazado de la divisoria de aguas. La pendiente del terreno es inferior a 2,53%, lo cual genera un aumento del número de corrientes paralelas al cauce principal (Figura 3C). La mayoría de estas corrientes alimentan un extenso humedal, sólo una de ellas confluye con el río Avilés unos metros antes de su desembocadura en el río Chico. El aforo 3 realizado en este tramo de la cuenca (Figura 2A) solo permitió obtener el perímetro mojado ya que la velocidad fue nula debido a la baja pendiente por donde discurre el cauce principal. El perfil longitudinal y los diferentes gradientes del río en los tres sectores de la cuenca están representados en la Figura 2C.

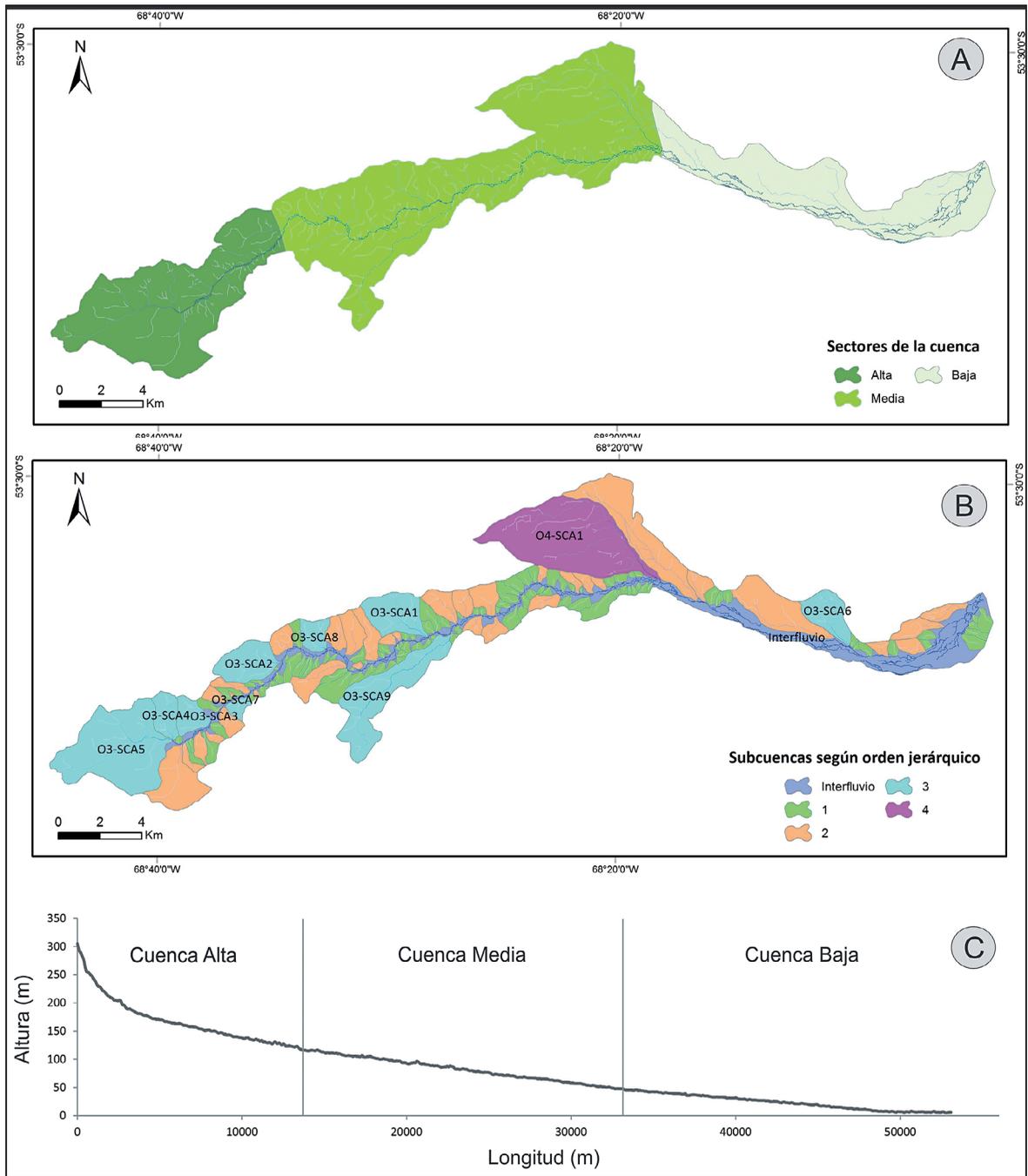


Figura 2: A) Sectorización de la cuenca en alta, media y baja B) Subcuencas del río Avilés. Dada la inexistencia de toponimia, se identificaron las subcuencas con siglas que corresponden a número de orden - Subcuenca Avilés n°. Ej. O3-SCA5 = Orden 3-Subcuenca Avilés 5. C) Perfil longitudinal del río Avilés.

Figure 2: A) Basin sectorization in upper, medium and low. B) Sub basins map according to their orders. The sub basins were identified with the acronym composed of order number and SubBasin Avilés number. E.g. O3-SCA5 = Order 3 -Sub-Basin Avilés 5. C) Longitudinal profile of Avilés river.

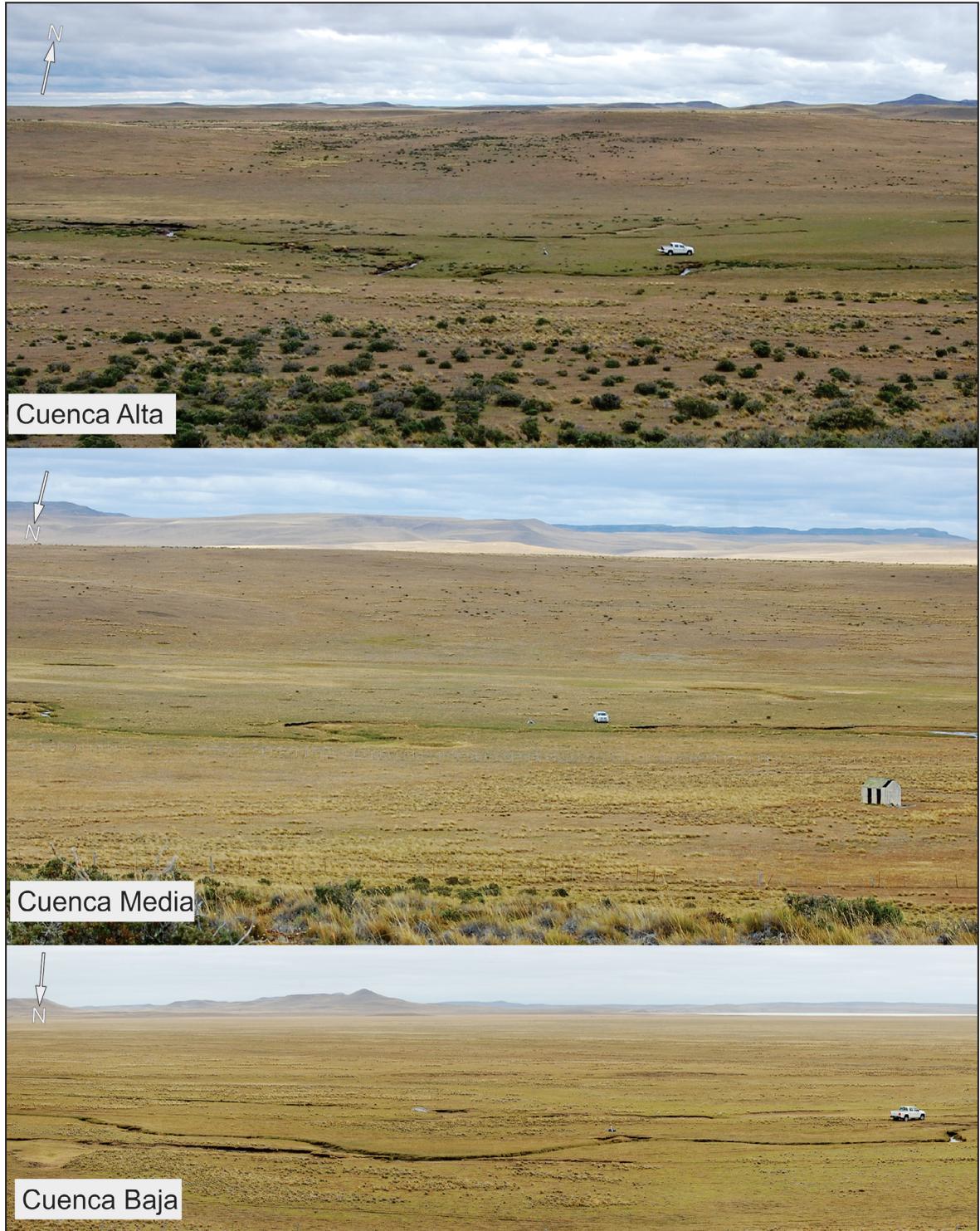


Figura 3: Valle del río Avilés en los diferentes sectores de la cuenca.
Figure 3: Avilés river valley in different sectors of the basin.

Una vez trazada la red de drenaje y establecido el orden jerárquico para cada uno de los cauces, se obtuvo una jerarquía máxima de orden 5 (Figura 4A). Se identificaron 98 subcuencas de orden 1 que drenan al curso principal, de las cuales 45 se localizan sobre la margen izquierda y las restantes sobre la margen derecha (Figura 2B). Las subcuencas de orden 2 son 34, de las cuales 24 se desarrollan sobre la margen izquierda del cauce principal. Las subcuencas de orden 3 son 8, de las cuales 6 se localizan también en la margen izquierda del río principal. Por último, se identificó una sola subcuenca de orden 4 que drena hacia el curso principal sobre la misma margen.

3.1. Variables de relieve:

Las características del relieve y las pendientes en una cuenca y su relación con parámetros hidrológicos han sido reconocidas desde hace tiempo (Senciales González 1999; Romero Díaz y López Bermúdez, 1987). La altura máxima de la cuenca del río Avilés es de 345 m y se ubica en el sector noroeste mientras que la altura mínima es de 5 m en la desembocadura del curso principal. El desnivel absoluto es de 340 m. La altura media es de 158,7 m.s.n.m; el 23,5% de la superficie de la cuenca se ubica por encima de ese valor (Figura 1B).

Se observa que las pendientes predominantes del área se ubican entre 0 y 6,58% mien-

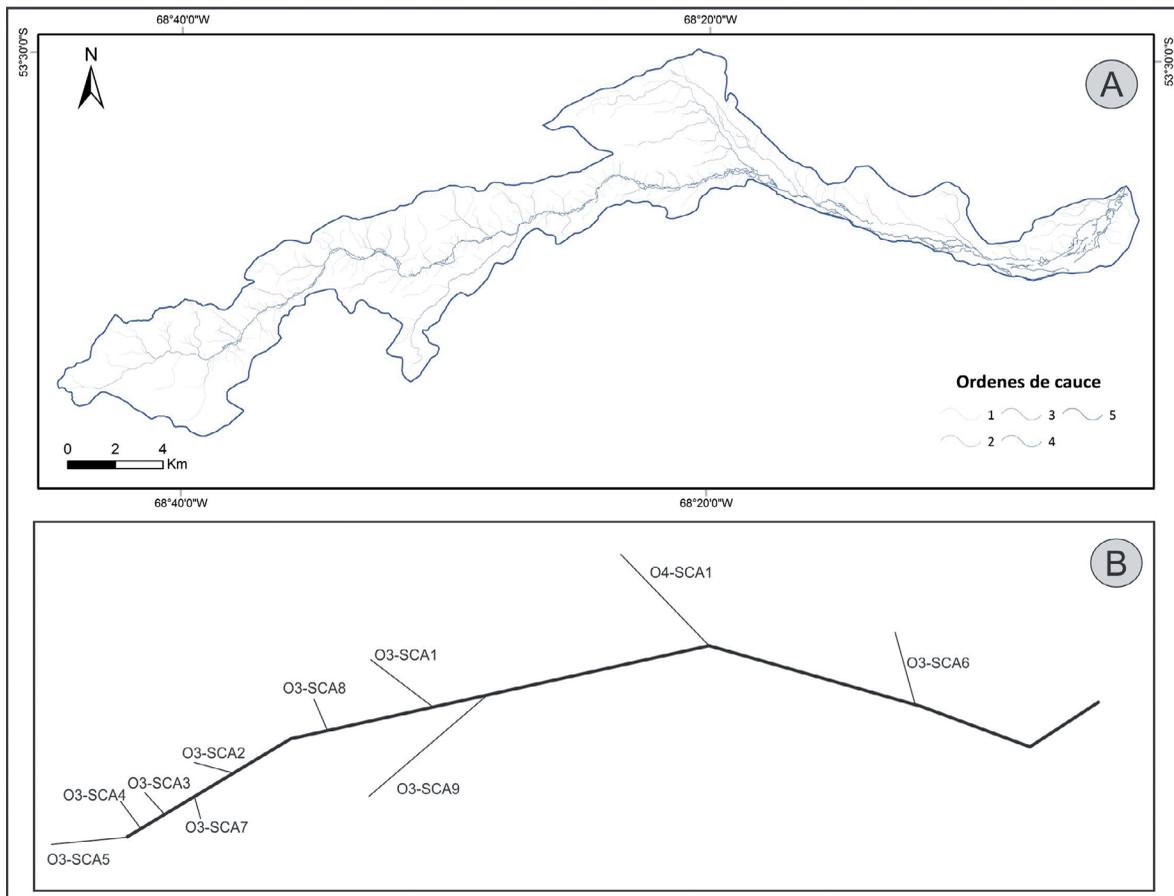


Figura 4: A) Cauces según orden jerárquico. B) Esquema sin escala de los ejes principales de drenaje.
 Figure 4: A) Channels according to hierarchical order. B) Diagram of the main drainage axis —out of scale—.

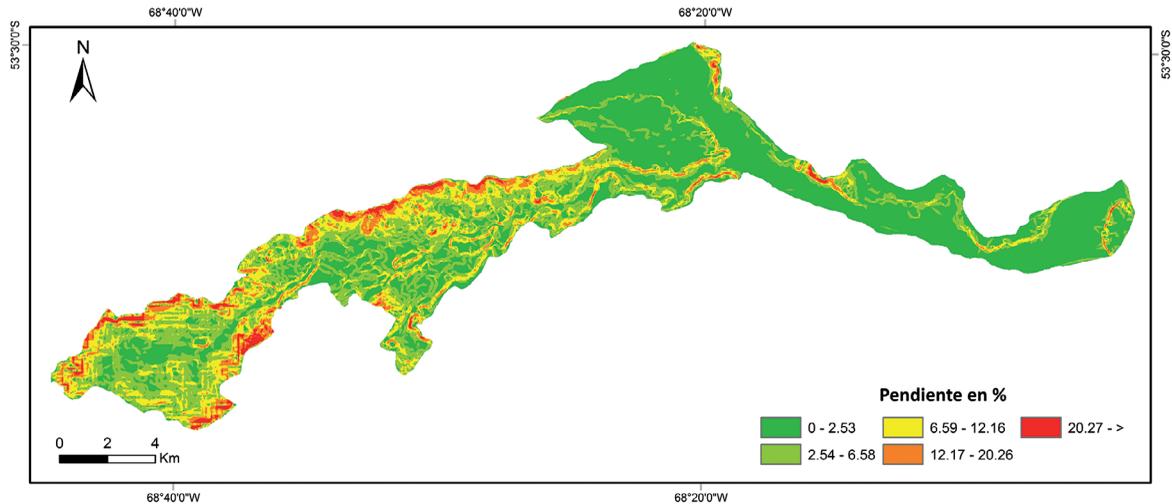


Figura 5: Mapa de pendientes.
Figure 5: Slope map.

tras que las pendientes superiores al 20,27% son las menos representadas, alcanzan un valor máximo de 64,6% (Figura 5). El valor medio de pendiente porcentual es de 4,48% y el de la desviación estándar es de 5,22%. Las pendientes con valores altos favorecen el desplazamiento del flujo en superficie disminuyendo la posibilidad de infiltración y permanencia en el sistema por más tiempo. Dadas las características serranas de la cuenca alta y media, en ellas se encuentran las mayores pendientes formando además las cabeceras de las subcuencas de orden 3 y 2, que drenan al cauce principal.

La *razón de relieve (Rr)* establece la relación entre el desnivel de la cuenca y la longitud máxima de la misma (Schumm, 1956). Está vinculado con la pérdida anual de sedimento y establece la capacidad erosiva de la cuenca (Sala y Gay, 1981). Otro índice complementario es la *relación de relieve (R)* planteado por Melton (1957) que se obtiene de la relación entre el desnivel absoluto y el perímetro de la cuenca. Para la cuenca del río Avilés se obtuvo un *Rr* de 0,007 y un *R* de 0,002. Estos valores indican que la cuenca presenta una baja capacidad erosiva. Al realizar un cambio de escala de análisis los valores de *Rr* y *R* obtenidos varían para cada subcuenca (Tabla 2). Se identifica la subcuenca O3-SCA7 como la que

posee mayor capacidad erosiva con 0,084 de *Rr* y 0,028 de *R*. Por el contrario, la subcuenca O4-SCA1 presenta valores de 0,004 *Rr* y 0,002 *R*. El primero es aún menor que el obtenido para la cuenca del río Avilés mientras que el *R* es igual.

3.2. Variables de topología y longitud de los cauces

El análisis topológico es la base del análisis cuantitativo de las cuencas de drenaje. Con este se establecen los órdenes jerárquicos de los cauces, la longitud y cantidad de los mismos. Estos conforman los principales parámetros, mientras que la razón de bifurcación es el índice más importante. Por otra parte, las variables de longitud agrupan los parámetros de longitud de cada orden de cauce, longitud total del cauce principal y longitud media y los índices de sinuosidad del cauce principal y la razón de longitud.

La *razón de bifurcación (Rb)* representa la proporción existente entre el número de cauces de un orden dado, con los de orden inmediatamente superior. La cuenca del río Avilés (O5-CA) tiene un valor medio de *Rb* de 4,40. Con el cambio de escala de análisis a nivel de subcuencas de orden 4 y orden 3 (Tabla 3)

Subcuencas	O4-SCA1	O3-SCA1	O3-SCA2	O3-SCA3	O3-SCA4	O3-SCA5	O3-SCA6	O3-SCA7	O3-SCA8	O3-SCA9
Razón de Relieve	0,004	0,043	0,021	0,056	0,062	0,028	0,007	0,085	0,084	0,008
Relación de Relieve	0,002	0,015	0,008	0,019	0,024	0,009	0,002	0,028	0,027	0,003

Tabla 2: Variables de relieve por cuenca y subcuencas.
Table 2: Relief variables for the whole basin and sub-basins.

Cuenca/ Subcuenca	O5-CA	O4-SCA1	O3-SCA1	O3-SCA2	O3-SCA3	O3-SCA4	O3-SCA5	O3-SCA6	O3-SCA7	O3-SCA8	O3-SCA9
Razón de bifurcación	4,40	2,79	2,67	3,00	3,00	2,50	3,08	2,33	2,25	2,25	2,75
Sinuosidad Hidráulica	1,47	1,48	1,20	1,17	1,63	1,20	1,19	1,29	1,25	1,22	1,31
Razón de longitud	6,55	1,63	1,65	1,01	1,56	1,69	1,72	2,34	2,17	0,75	3,75
Lt (km)	298.04	33.23	7.83	7.38	5.61	4.76	18.01	4.86	2.58	4.52	14.57

Tabla 3: Valores medios de las variables de topología y longitud de los cauces, por cuenca y subcuencas.
Table 3: Mean values of topologic and channel's length variables for the whole basin and sub-basins river.

no se identifican variaciones significativas en los resultados de Rb medio. Se obtuvo un valor máximo Rb de 3,08, correspondiente a la cuenca O3-SCA5 y un valor mínimo Rb de 2,25 correspondiente a la cuenca O3-SCA7.

El índice de sinuosidad hidráulica (Ish) relaciona la longitud del cauce principal, la longitud de su valle en línea recta (Schumm, 1956). Este refleja la forma del canal en base a la clasificación de Morisawa (1985). Tanto a nivel de cuenca O5-CA como de subcuencas la mayoría presentan valores de Ish comprendidos entre 1,05 y 1,5 que indican cauces sinuosos. Sólo la subcuenca O3-SCA3 posee un valor mayor a 1,5 lo cual caracteriza su cauce como meandriforme.

La razón de longitud (RI) representa la proporción que existe entre la longitud media de los segmentos de un orden dado y los correspondientes a los del orden superior (Tabla 3). Los valores más bajos del índice indican una mayor energía concentrada en el cauce principal y los más altos indican una paulatina concentración de caudales. A nivel de cuenca (O5-CA) el resultado es de 6,55 km. Si se analizan en forma detallada las subcuencas según los órdenes jerárquicos, la razón de longitud varía entre 0,75 km (O3-SCA8) y 3,75

km (O3-SCA9). Las subcuencas O3-SCA6, O3-SCA7 y O3-SCA9 son las que poseen valores de RI mayores a 2. Las primera corresponde a la cuenca baja y las restantes son las únicas que tributan sobre la margen derecha en la cuenca alta y media.

3.3. Variables de tamaño y forma de las cuencas

La variable tamaño o área de una cuenca se refiere a una condición geométrica y se relaciona con la capacidad de coleccionar agua y drenarla a un cauce común independientemente de la precipitación, litología y capacidad de infiltración que caracteriza el área. Por ello se asume que a mayor área, mayor volumen de agua captada y transmitida al colector principal. La razón de elongación es el índice que representa mejor la relación entre la forma y la hidrología de la cuenca.

La cuenca del río Avilés tiene un área de 156,74 km². Según la clasificación de Chow *et al* (1994), ésta es una cuenca pequeña (< a 250 km²). Las subcuencas de orden 3 poseen una superficie que varía entre los 16,13 km² y 0,8 km² ubicadas en el SE de la cuenca alta. El área media de las subcuencas de este orden

es de 4,21 km². La subcuenca de orden 4 posee un área de 19,81 km² (Tabla 4).

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). Esta característica se relaciona con el comportamiento hidrológico ante eventos de crecida: los índices más bajos indican cuencas

elongadas y poseen mayor retardo en la concentración de la escorrentía (Senciales González, 1999). La cuenca general (O5-CA) tiene una *Re* de 0,21 o elongada. Entre las subcuencas de orden 3, es la O3-SCA9 la que posee menor *Re* (0,37) y la O3-SCA5 de mayor *Re*, con un valor de 1,02 (Tabla 4 y Figura 6).

3.4. Variable de intensidad fluvial

Las variables de intensidad fluvial agrupan índices que resultan de la combinación de pará-

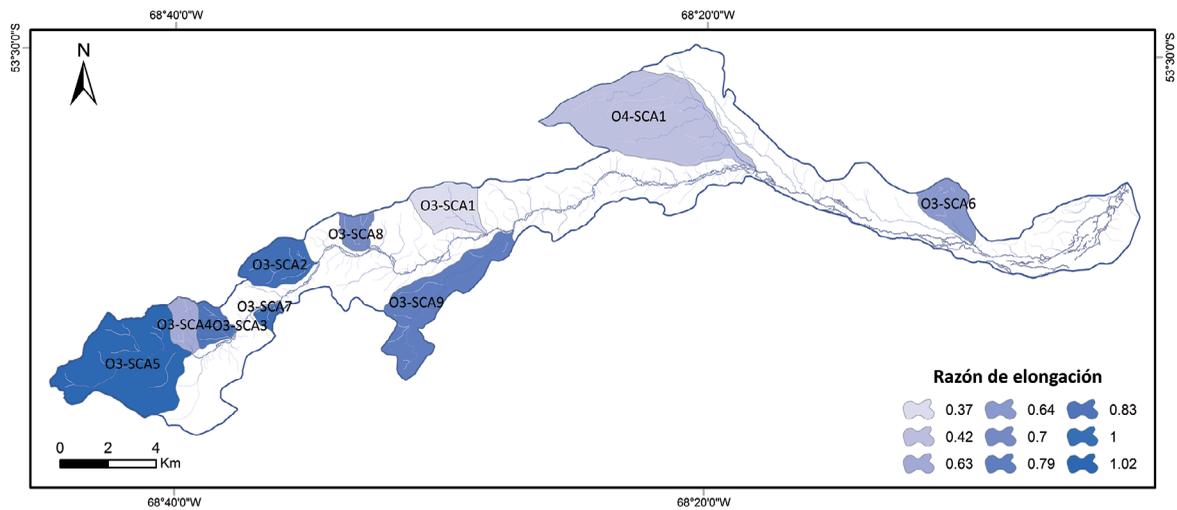


Figura 6: Razón de elongación según subcuencas de orden 3 y 4. Los índices de cada subcuenca se presentan en la Tabla 4.
Figure 6: Elongation ratio map of sub-basins with order 3 and 4. Index values of each sub-basin are shown in Table 4.

Cuenca/Subcuenca	Área de la cuenca (km ²)	Perímetro (km)	Longitud de la Cuenca (km)	Razón de elongación
O5-CA	156,74	132,73	48,14	0,21
O4-SCA1	19,81	21,69	10,6	0,42
O3-SCA1	4,71	9,37	3,39	0,79
O3-SCA2	4,50	8,64	3,35	0,70
O3-SCA3	2,07	6,20	2,05	1,00
O3-SCA4	2,22	6,29	2,41	0,64
O3-SCA5	16,13	18,53	6,03	1,02
O3-SCA6	3,61	8,25	2,97	0,63
O3-SCA7	0,80	4,11	1,35	0,83
O3-SCA8	1,78	5,95	1,91	1,00
O3-SCA9	10,15	20,41	7,7	0,37

Tabla 4: Variables de tamaño y forma por subcuencas y cuenca.
Table 4: Size and shape variables for the whole basin and sub-basin.

metros e índices. La más utilizada es la densidad de drenaje ya que sus resultados pueden ser relacionados con las características climáticas, litológicas, edáficas y de cubierta vegetal. El resto de los índices complementan la explicación de la intensidad fluvial en una cuenca (Romero Díaz y López Bermúdez, 1987).

La *densidad de drenaje (Dd)* representa la eficiencia de drenaje y señala el estado erosivo de una cuenca hidrográfica (Senciales González 1999). En el caso de estudio, la *Dd* es de

1,9 km/km², mientras que el mayor valor es de 3,2 km/km² y corresponde a O3-SCA7 (3,2), ubicada en la margen sur del curso principal. En cambio, el mínimo valor es de 1,12 km/km² y lo tiene la subcuenca O3-SCA5 () (Figura 7A, Tabla 5). Estos valores indican una densidad de drenaje baja y textura gruesa (Horton, 1945, Gregory y Wallings, 1973, Morisawa, 1985, Senciales González, 1999 y Marchetti, 2000).

El índice de frecuencia (*If*) es el cociente entre el número de cauces de primer orden con el área de la cuenca. Su importancia radica en

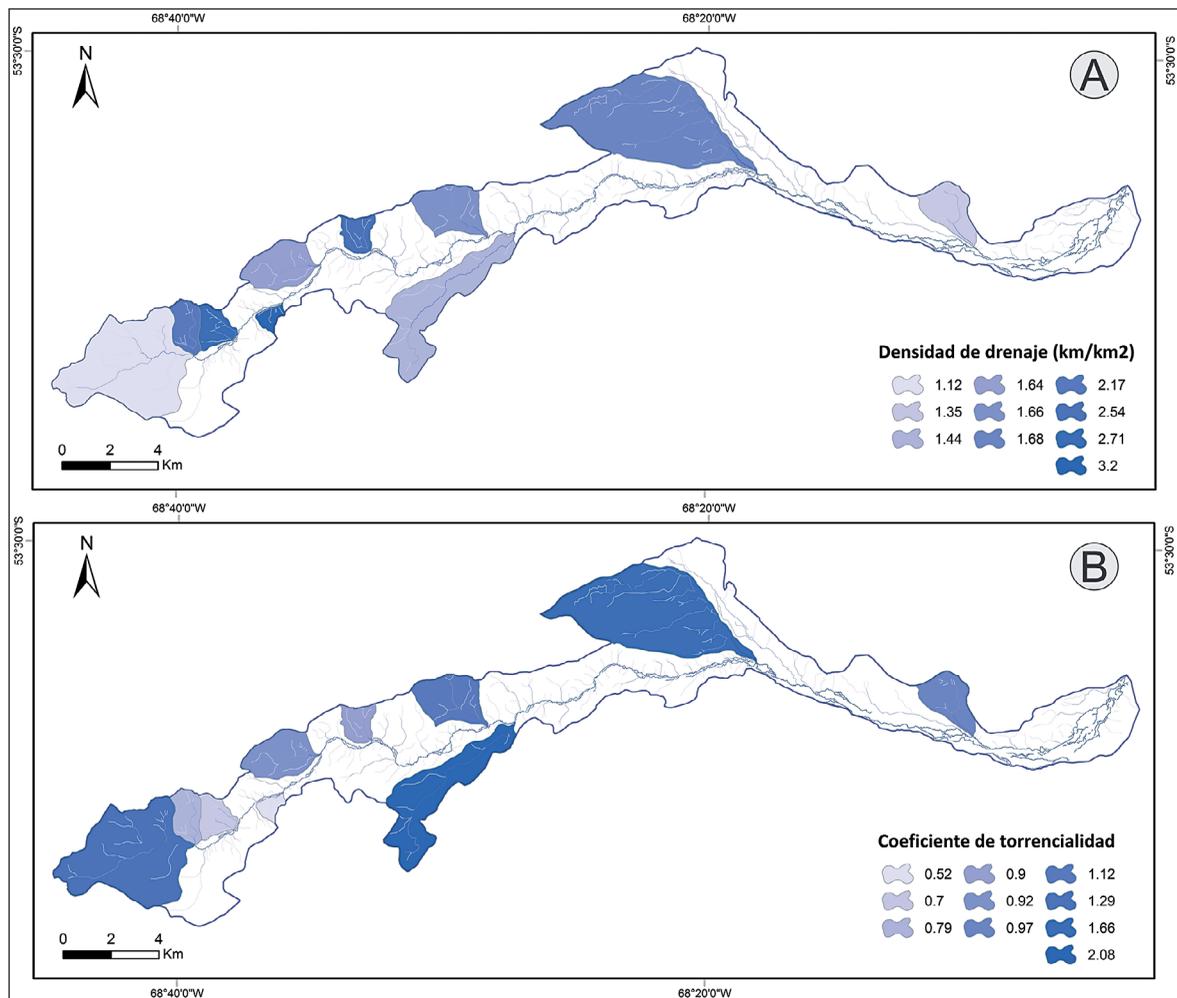


Figura 7: A) Densidad de drenaje según subcuencas de orden 3 y 4. B) Coeficiente de torrencialidad según subcuencas de orden 3 y 4. Los índices de cada subcuenca se presentan en la Tabla 5.

Figure 7: A) Drainage density map. B) Torrential coefficient map. In both figures, only 3 and 4 orders sub-basins are mapped. Index values of each sub-basin are shown in Table 5.

Cuenca/ Subcuenca	Coefficiente de almacenamiento	Densidad de drenaje	Coefficiente de torrencialidad	Índice de frecuencia	Constante de mantenimiento del curso
O5-CA	1,38	1,90	4,21	1,76	2,39
O4-SCA1	0,59	1,68	1,66	1,01	0,60
O3-SCA1	0,62	1,66	1,12	1,48	0,60
O3-SCA2	0,34	1,64	0,92	1,77	0,61
O3-SCA3	0,52	2,71	0,70	3,86	0,37
O3-SCA4	0,68	2,14	0,79	2,70	0,47
O3-SCA5	0,56	1,12	1,29	0,87	0,90
O3-SCA6	1,00	1,35	0,97	1,38	0,74
O3-SCA7	0,96	3,20	0,52	6,20	0,31
O3-SCA8	0,34	2,54	0,90	2,80	0,39
O3-SCA9	1,36	1,44	2,08	0,69	0,70

Tabla 5: Variables de intensidad fluvial por subcuencas y cuenca.
Table 5: Fluvial intensity variables for the whole basin and sub-basin.

que representa la intensidad de los procesos iniciales de arroyada concentrada (Senciales González, 1999). En el caso de la cuenca general el valor es de 1,76 y a escala de subcuenca el valor máximo obtenido es de 6,2 para la O3-SCA7 (Tabla 5).

El *coeficiente de torrencialidad (Ct)* se obtiene luego de multiplicar la *Dd* por el *If*. 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). La cuenca del río Avilés (O5-CA) posee un coeficiente de 4,21. En la cuenca alta, donde se localizan las subcuencas O3-SCA2, 3, 4, 5 y 7 (Figura 7B), el *Ct* medio es de 0,84. En cambio, en la cuenca media donde se localizan las subcuencas: O3-SCA8, 9 y O4-SCA1, el valor medio es de 1,54. Por último, en la cuenca baja, O3-SCA6 posee un valor de *Ct* de 0,97.

El *coeficiente de almacenamiento del canal (Ca)* es el cociente entre la razón de longitud y la razón de bifurcación. Permite evaluar la capacidad de almacenamiento de la red de drenaje e incide en la modulación de la intensidad del pico de crecida a medida que esta pasa por los diferentes puntos del canal (Horton, 1945). El río Avilés posee un *Ca* de

1,38 (Tabla 5). A nivel de subcuenca, el valor mínimo (0,34) se encuentra sobre la margen izquierda y corresponde a la subcuenca O3-SCA02 mientras que el valor máximo (1,36) lo posee la subcuenca O3-SCA9 sobre la margen derecha. Por otra parte, el valor medio de *Ca* de las subcuencas de O3 es de 0,62.

La *constante de mantenimiento del cauce* es el valor inverso de la densidad de drenaje (*C*) (Schumm, 1965). El índice decrece a medida que incrementa la erosionabilidad. Las cuencas con valores altos representan una mayor permeabilidad del sustrato (Bhagwat *et al.*, 2011; Sreedevi *et al.*, 2013). Este índice presenta la superficie areal necesaria para mantener funcional 1 km de cauce. La cuenca del río Avilés presenta un valor de 2,39 km²/km. Este resultado se aleja de los obtenidos para cada subcuenca, los que varían entre 0,31 km²/km a 0,90 km²/km

4. Morfometría y Geomorfología

La distribución de las subcuencas de orden mayor a 3 según la margen del colector muestra un mayor número sobre la margen izquierda de la cuenca alta y la parte occidental de la cuenca media. Sólo dos subcuencas

del mencionado orden se desarrollan sobre la margen derecha (Figura 4B). En la cuenca media predominan las subcuencas de orden bajo; sólo en la margen izquierda del tramo final se desarrolla una subcuenca de orden 4 generando el aumento de orden de jerarquía del curso principal. En la cuenca baja, sólo se desarrolla una subcuenca de orden 3 y varias de orden menor en la margen izquierda. Esta configuración está condicionada por el emplazamiento geomorfológico de la red fluvial. La margen izquierda de las cuencas alta y media posee una configuración acorde a relieves serranos mientras que en la margen derecha la presencia de la depresión extra-cuenca de las lagunas Hortensia Chica, Hortensia, Amalia y O'Connor (Figura 1B) condiciona el desarrollo de subcuencas de orden 3 o mayor en ese sector y genera una forma irregular en su divisoria de aguas meridional. Sobre la margen izquierda del límite entre las cuencas media y baja se desarrollan dos subcuencas de gran tamaño que extienden el límite externo hacia el NO debido al desarrollo de la red hídrica en un paleodrenaje que separa dos unidades de planicies de origen fluvioglaciario (Bujalesky *et al.*, 2001). La escasez de subcuencas de orden 3 o mayor en la cuenca baja a favor de corrientes extensas y paralelas al curso principal es resultado del escurrimiento actual en un paleovalle excavado en planicies originadas por el drenaje de fusión glaciario durante el Pleistoceno medio, cuya parte final corresponde a paleobahías del ambiente marino de aquellos tiempos (Bujalesky *et al.*, 2001).

A nivel general de cuenca, el resultado de las variables de relieve indica una baja capacidad erosiva del río Avilés en respuesta a la escasa pendiente general del terreno que caracteriza más del 80% de la extensión de de la cuenca. Al realizar un cambio de escala se pudieron identificar subcuencas con mayor capacidad erosiva y una respuesta hidrológica más rápida vinculada a las áreas con pendientes mayores a 15°. Estas subcuencas se encuentran ubicadas en las cuencas alta y media del río Avilés. Ello indica un comportamiento diferencial de las subcuencas entre los sectores alto, medio y bajo.

El valor medio de R_b (4,4) indica que la red de drenaje no tiene marcada dependencia estructural (Strahler, 1964). Asimismo todos los valores de R_b obtenidos en las diferentes subcuencas las definen del mismo modo que la cuenca principal. La R_l es un índice complementario a R_b . En la parte alta de la cuenca, las subcuencas que presentan una mayor R_l se encuentran en la margen derecha del río, en cambio las del margen izquierdo presentan valores más bajos. En este caso, las pendientes condicionan los valores del índice, estableciendo que los máximos desniveles tienen menor razón de longitud. Es posible establecer que los resultados de la R_l de cada subcuenca no influyen en el R_l de la cuenca de orden 5, la cual presenta una lenta concentración de los caudales.

La razón de elongación es el índice que confirma lo mencionado anteriormente. Individualmente cada subcuenca tiene una respuesta hidrológica teórica inmediata ante la incorporación de agua al sistema lo cual se traduce en un incremento de caudal en el canal principal. En este caso se diferencian dos zonas de diferente respuesta hidrológica según la disposición en el terreno respecto del cauce principal del río Avilés. La cuenca alta, donde se localizan las subcuencas O3-SCA2, O3-SCA3, O3-SCA4, O3-SCA5, O3-SCA7 y cuyo valor medio de R_e es de 0,85 presentaría respuesta hidrológica rápida. La cuenca media y baja, conformadas por las subcuencas O3-SCA8, O3-SCA9, O4-SCA1 (cuenca media, con R_e de 0,59) y subcuenca O3-SCA6 (cuenca baja con R_e de 0,63) presentarían una respuesta hidrológica lenta ante eventos de precipitación intensa y fusión repentina de hielo-nieve en días con alta insolación. Las subcuencas O3-SCA9, O3-SCA6 poseen un alto coeficiente de almacenamiento de canal, lo cual refuerza la interpretación previa y las identifica como subcuencas en las que existiría un retardo en la concentración de la escorrentía en el caso de eventos de crecida.

La densidad de drenaje presenta valores bajos, tanto a nivel cuenca como subcuenca, sin embargo, existen diferencias entre las cuen-

cas de orden 3. Esta diferencia podría atribuirse a una capacidad diferencial de infiltración del suelo, descartándose la influencia litológica y las condiciones de precipitación ya que ambos se presentan en forma similar en este sector de la cuenca. Los mayores valores de *Dd* se registraron en la cuenca alta y en el sector más occidental de la cuenca media. El índice de frecuencia complementa este índice; observándose que las subcuencas con mayor *Dd* poseen los mayores valores de *If*. La cuenca del río Avilés posee un alto coeficiente de torrencialidad debido a la gran cantidad de tributarios de orden 1 que drenan directamente al cauce principal de la cuenca (Figura 4A). Si se comparan los coeficientes de las subcuencas se observará que las diferencias están dadas por su superficie areal en relación a la cantidad de cursos de orden 1 que la drenan. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los coeficientes cercanos a 1 se registran en la cuenca alta. La constante de mantenimiento del curso es la inversa de la densidad de drenaje y los valores menores a 0,5 se encuentran en la cuenca alta. Estos valores indican menor posibilidad de infiltración a favor de una mayor escorrentía superficial. A diferencia de valores mayores que indican la necesidad de más área para producir un flujo superficial, lo cual implica que parte del agua se puede evaporar o infiltrar.

4. Conclusiones

Los índices morfométricos obtenidos caracterizan cuantitativamente a la cuenca del río Avilés, Tierra del Fuego, Argentina. Esto permite inferir condiciones de escurrimiento y disponibilidad de agua que ayudan a conocer la dinámica hídrica. Los resultados obtenidos son una herramienta para futuros estudios que consideren la aplicación de algoritmos en una cuenca sin información hidrológica. La cuenca del río Avilés alcanza un orden 5 de jerarquía. Está conformada por un total de 141 subcuencas (orden 1 a 4), de las cuales sólo el 5,6% es de orden 3 y una sola de orden 4. Las subcuencas tienen una distribución

espacial irregular, concentrándose en el sector alto, donde existe un relieve serrano de sustrato sedimentario y depósitos glaciares. Las geoformas como planicies fluvio-glaciares, paleovalle y paleobahía que integran los sectores medio y bajo de la cuenca no contribuyen con la organización del drenaje ni con la formación de subcuencas de orden jerárquico mayor a 3. Esto se atribuye al bajo valor de pendiente de dichas geoformas y a una mayor capacidad de infiltración de los materiales gravo-arenosos que las conforman.

Los resultados que arroja la constante de mantenimiento de cauce indican baja permeabilidad del sustrato, principalmente en las subcuencas de la cuenca alta. Estudios específicos de tasas de infiltración, actualmente no disponibles, servirán para confirmar esta conclusión.

De las variables de tamaño y forma de la cuenca que se analizaron, la razón de elongación es la que mejor representa la capacidad de respuesta de las subcuencas ante la incorporación de agua al sistema hídrico. Los valores obtenidos indican que los cursos de la zona alta son los que más rápidamente responderán a situaciones de crecida. Por otra parte, y de acuerdo a los valores del coeficiente de torrencialidad, las subcuencas ubicadas en el sector alto son las que concentrarán más rápidamente el escurrimiento ante situaciones de precipitaciones intensas y/o fusión nival rápida y por lo tanto, las que desarrollarán mayor trabajo erosivo concentrado en los cauces.

La aplicación de los índices seleccionados contribuyó a caracterizar la dinámica hídrica de una cuenca de ambiente semiárido de estepa en la que no existen datos hidrométricos. La *Rr*, *R*, *Rb*, *Ish* y *Dd* caracterizan el contexto geomorfológico de la cuenca, mientras que *Rl*, *Re*, *If*, *Ct*, *C*, *Ca* dan pautas del posible comportamiento del escurrimiento en dicho contexto. Los índices aplicados son herramientas que ayudarían a la elaboración de pautas de manejo del agua en los campos ganaderos a nivel de subcuencas y cuenca del río Avilés.

Agradecimientos

Agradecemos a propietarios, administradores y personal de las estancias El Salvador, San Julio, Flamencos y María Behety por su predisposición para facilitar el acceso a los sectores de trabajo ubicados en sus campos. La Estación Astronómica Río Grande facilitó la logística para el trabajo de campo. El Departamento de Geografía de la U.N.S. proveyó de instrumental para la medición de corrientes en las cuales colaboró El Tec. Ramiro López (CADIC). Este trabajo fue financiado mediante el proyecto PIP CONICET 0422/10.

Referencias Bibliográficas

- Bhagwat, T.N.; Shetty, A.; Hegde, V.S. (2011). Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management. A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka. *Catena*, 87, 52-59.
- Bujalesky, B.; Coronato, A.; Isla, F. (2001). Ambientes glaciifluviales y litorales Cuaternarios de la región del Río Chico, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56 (1): 73-90.
- Ciccacci, S., D'Alessandro, L. Fredi, P.; Lupia Palmieri E. (1992). Relations between morphometric characteristics and denudational processes in some drainage basins of Italy. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, N.F., 36 (1), 53-67.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. (1994). Hidrología Aplicada. Ed. McGrawHill, Bogotá, 584 pp.
- Codignotto, J.; Malumian, N. (1981). Geología de la Región al N del paralelo 54° L.S. de la Isla Grande de Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36,1, 44-88.
- Coronato, A.; Coronato, F.; Mazzoni, E.; Vázquez, M. (2008). Physical Geography of Patagonia and Tierra del Fuego. In: *Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego* (J. Rabassa, ed.) Development in Quaternary Sciences, Elsevier, Amsterdam, 11, 3, 13-56.
- Costa, J.E. (1987). Hydraulics and basin morphology of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 93, 313-338.
- Dofo, N.; 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.
- Esper Angillieri, M. Y. (2008). Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*, 55, 107-111.
- García-Bartual, R. (1989). Estimación de la respuesta hidrológica de una cuenca sobre la base de la teoría del hidrograma unitario geomorfológico. *Cuaternario y Geomorfología*, 3, (1-4), 1-7.
- Gardiner, V. (1975). Drainage basin morphometry. British Geomorphological Group, Technical Bulletin 14, 48 pp.
- Gregory, K.J.; Walling, D.E. (1973). *Drainage basin form and process: a geomorphological approach*. Ed. Edwards Arnold, Londres, 458 pp.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-230.
- Leopold, L.B.; Wolman, M G.; Miller, J.P. (1992). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Ed. Dover Publication, Mineola, 522 pp.
- Magesh, N.S.; Jitheshlal, K.V.; Chandrasekar, N.; Jini, K.V. (2013). Geographical information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala, India. *Applied Water Science*, 3, 467-477.
- Marchetti, M. (2000). Geomorfología Fluviale. Ed. Pitagora Editrice, Bologna, 247 pp.
- Melton, M.A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology. Office of Naval Research, Geography Branch, Project NR, Technical Reports, 11.
- Mesa L. M. (2006). Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environmental Geology*, 50 (8), 1235-1242.
- Morisawa, M. E. (1962) Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 73 (9), 1025-1046.
- Morisawa, M.E. (1985). *Rivers, form and processes*. Ed. Longman, London, 222 pp.
- Moussa, R. (2003). Morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response. *Hydrological Processes* 17, 33-58.
- Mueller, J. R. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the Association of American Geographers*, 58 (2), 371-385.

- Ozdemir H.; Bird, D. (2009). Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point floods. *Environmental Geology*, 56, 1405.
- Olivero, E.; Malumian, N.; Martinioni, D. (En prensa). Mapa geológico de la Isla Grande de Tierra del Fuego e Isla de los Estados, República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- Paretta, K.; Paretta, U. (2011). Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2 (1), 248-269.
- Romero Díaz, M.A. (1989). *Las cuencas de los ríos Castril y Guardal (Cabecera del Guadalquivir)*. Ed. Ayuntamiento de Huéscar, Granada, 285 pp.
- Romero Díaz, M. A.; 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.; Gay, R. (1981). Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. *Notas de Geografía Física*, 4, 41-65.
- Schumm, S. A. (1956). The evolution of drainage system and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597-646.
- Senciales González, J. M. (1999). *Redes Fluviales, metodología de análisis*. Ed. Universidad de Málaga, Málaga. 337 pp.
- Sreedevi, P.D.; Subrahmanam, K.; Ahmed, S. (2005). The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. *Environmental Geology*, 47, 412-420.
- Sreedevi, P.D.; Sreekanth, P.D.; Khan, H.H.; Ahmed, S. (2013). Drainage morphometry and its influence on hydrology in an semi arid region: using SRTM data and GIS. *Environmental Earth Science*, 70, 839-848.
- Strahler, A. N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 923-938.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: *Handbook of applied hydrology* (V.T. Chow, ed.). Mac Graw Hill, New York, 439-476 pp.
- Thomas, J.; Joseph, S.; Thirivikramji, K.P.; Age, G.; Kannan, N. (2012). Morphometrical analysis of two tropical mountain river basins of contrasting environmental settings, the southern Western Ghats, India. *Environmental Earth Sciences*, 66, 2353-2366.
- Tuhkanen, S. (1992). The climate of Tierra del Fuego from a vegetation geographical point of view and its ecoclimatic counterparts elsewhere. *Acta Botanica Fennica* 145, 64 pp.