



MORFOMETRÍA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA

Carolina Manuela Aumassanne¹
Fernanda Julia Gaspari²
Maria Eugenia Bege³
Paolo Daniel Sartor¹
Patricio Oricchio³
Carlos Marcelo Di Bella^{3,4,5}

(Manuscrito recibido el 21 de diciembre de 2017, en versión final 24 de mayo de 2018)

Para citar este documento

Aumassane, C.M., Gaspari, F.J., Bege, M.E., Sartor, P.D., Oricchio, P., Di Bella, C.M. (2018). Morfometría de la cuenca alta del río Colorado, Argentina. *Boletín geográfico*, 40 (1), 13-29.

Resumen

Las subcuencas del río Grande y del río Barrancas conforman la cuenca alta del río Colorado y la abastecen de agua a partir de la nieve que precipita en las altas cumbres. Conocer las características morfométricas y funcionales de una cuenca es esencial en estudios de hidrología y modelación del agua. El objetivo fue analizar e interpretar los parámetros e índices morfométricos de la cuenca alta del río Colorado, Argentina. La metodología aplicada se basó en establecer y analizar los parámetros morfométricos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y planillas de cálculo, a partir de un modelo digital de elevación. La longitud del río Grande es tres veces superior a la del Barrancas, con un área de drenaje que sigue la misma relación. Según el Coeficiente de Gravelius ambas subcuencas son similares en su forma, rectangular oblonga. Además, poseen la mitad de su superficie entre los 1.500 y 2.500 m.s.n.m., con pendientes predominantes de 0 a 15°. En cuanto a la orientación el 54

¹ Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, 8201, Argentina.
e-mail: aumassanne.carolina@inta.gob.ar

² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, 4198, Buenos Aires.

³ Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar, 1686, Buenos Aires; Argentina. Argentina

⁴ Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); Argentina

⁵ Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

% de las laderas están orientadas al sur en ambos casos. El río Barrancas posee mayor desnivel entre nacimiento y desembocadura, en un área drenada menor. Este estudio ofrece importante información de base para posteriores investigaciones de modelado de la dinámica espacio temporal del caudal en la cuenca.

Palabras clave: río Grande, río Barrancas, SRTM

MORPHOMETRIC OF THE COLORADO RIVER HIGH BASIN, ARGENTINA

Abstract

The Grande and Barrancas Rivers watersheds conform the upper basin of the Colorado River. They provide discharge from snow precipitated in the high mountain peaks. Morphometric and functional characteristics analysis of a basin is elementary in hydrology and modeling approach. The aim of this work was to analyze and interpret the morphometric parameters and derived indices of the upper basin of the Colorado River, Argentina. Parameters quantification and analysis were based on a digital elevation model and Geographic Information Systems. Length of the Grande River is three times greater than Barrancas River ones, with a drainage area that follows the same relationship. Gravelius coefficients evidenced similarities in watershed shapes, both rectangled-oblongued. Both watersheds have a half of their area between 1500 and 2500 m.a.s.l., with predominant slopes between 0 and 15°. In both cases, 54% of slopes are orientated to south direction, meaning predominantly shady. Barrancas River has a greater difference between the source and the mouth, having a smaller drained area. Results from this study offers an important source of base information to further research and modeling spatio-temporal dynamics of flow of River basin.

Keywords: Grande River, Barrancas River, SRTM

Introducción

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible a nivel territorial (Senisterra, Rodríguez Vagaría, Gaspari, & Mazzucchelli, M. G. 2014). El análisis morfométrico en una cuenca de drenaje es de gran importancia para poder comprender e interpretar su comportamiento morfo-dinámico y su respuesta hidrológica (Méndez & Marcucci, 2006). La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional con la posibilidad de cosecha hídrica (Gaspari, Rodríguez Vagaría, Senisterra, Delgado & Besteiro, 2013), ante eventos climáticos, y a la generación de una respuesta a los mismos, como son la escorrentía superficial, expresada en términos

de caudales o la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. Además, mediante la caracterización morfométrica es posible comparar cuencas hidrográficas a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Gaspari, Vagaría, Senisterra, Denegri, Delgado & Besteiro, 2012; Busnelli & Horta, 2014).

Las formas del terreno pueden ser descritas y cuantificadas por la parametrización del relieve a partir de un modelo digital de elevación (MDE) (Bolongaro-Crevenna, Torres-Rodríguez, Sorani, Frame & Ortiz, 2005), conformando este último una variable de entrada para la construcción de diversos modelos digitales de terreno (Martínez-Zavala et al., 2005). Durante las últimas dos décadas se incrementó la disponibilidad y precisión de los MDE, a la vez que se desarrollaron algoritmos adicionales para derivar nuevas variables. Así, numerosos estudios clasificaron las formas del terreno a partir de un MDE empleando variables geomorfológicas tales como aspecto, pendiente, curvatura, rugosidad, índice de posición topográfica, entre otros, ya sea individualmente o combinando dos o más variables (Sánchez Serrano, Tejero López & Bergamín de la Vina, 1998; Weiss, 2001; Schmidt & Hewitt, 2003; Bolongaro-Crevenna et al., 2005; Ardiansyah Prima, Echigo, Yokoyama & Yoshida, 2006; Bayona Celis, Rivera Sánchez, Valtierra, Martínez Reséndiz & Montoya Martínez, 2006; Drăguț & Blaschke, 2006; Gormain, Puissant, Lespez & Ballouche, 2006; Tagil & Jenness, 2008; Cuomo & Guida, 2010; Clennon et al., 2010; Castillo, Chichiple, & Salas López, 2017; Gómez et al., 2017).

La caracterización morfométrica de una cuenca es, generalmente, la base de investigaciones para generar una idea global sobre el funcionamiento del sistema ambiental (Felicísimo, 1994; Wise, 2000; Selvi & Bildirici, 2008; Sharma, Tiwari & Bhadoria, 2009), teniendo en cuenta las áreas de interfase agua-aire y agua-sedimento (Montoya Moreno & Montoya Moreno, 2009), puesto que la configuración del relieve constituye un factor de control clave para variados procesos naturales. El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica se realiza a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje e índices. Estos parámetros son indicadores destinados a determinar la influencia de la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari, Senisterra, Delgado, Rodríguez Vagaría & Besteiro, 2010).

La importancia del río Colorado en la región, radica en que es la principal, y en muchos casos única fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones para diversos usos (urbano, riego, minería, recreativo y extracción de petróleo), en toda la diagonal árida de las provincias que recorre y de otras poblaciones extra-cuenca. Las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas son los principales tributarios del río Colorado sobre la Cordillera de los Andes, donde los principales aportes hídricos son mediante precipitación nival, la cual está condicionada por factores climáticos y geográficos (Boninsegna & Llop, 2015).

La morfometría de las subcuencas influye en la mayor o menor capacidad de almacenamiento y velocidad de fusión de la nieve, entre otros, originando diferencias en los tiempos en que los ríos alcanzan su máximo caudal. Por ejemplo, el efecto del alta pendiente hace que la velocidad de flujo de agua sea alta, por lo tanto, se necesita

menos tiempo de escurrimiento para llegar al cauce principal. A su vez, conocer la orientación de las laderas es importante porque se relaciona con las horas en las que incide el sol sobre la ladera de la cuenca, dirección de los vientos predominantes, flujos de humedad, vegetación, entre otros. Por lo tanto, conocer la morfometría de estas subcuencas es la base para el estudio de la dinámica de los recursos hídricos superficiales, de cambios en el uso y cobertura del suelo y de disponibilidad de agua. El objetivo de este trabajo es analizar e interpretar los parámetros e índices morfométricos de la cuenca alta del río Colorado, Argentina.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la naciente del río Colorado, constituida por las subcuencas del río Grande y del Barrancas (Figura 1) ubicadas en la provincia de Mendoza y definiendo el límite interprovincial entre Mendoza y Neuquén, respectivamente. La cuenca del río Colorado se conforma además por sectores de las provincias de Río Negro, La Pampa y Buenos Aires, con una superficie total de 47.458 km², y un régimen nival puro (Lascano, 2005; Lauro et al., 2016).

El río Grande se inicia en el límite con Chile, en el macizo central de Los Andes (34° 05' S y 70° 22' O), con sus principales tributarios los ríos Cobre y Tordillo. Tiene alimentación nival casi exclusiva y su caudal medio anual es de 107 m³/s (COIRCO, 2014). Por su parte, el río Barrancas nace en la porción meridional de Los Andes Centrales (36° 05' S y 70° 22' O), a partir de las lagunas Negra y Fea, cuya alimentación es de transición, entre las hoyas nivales al norte y pluvio-nivales al sur. Su caudal medio anual es de 36,6 m³/s (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública & COIRCO, 2013). En estas dos subcuencas se genera la mayor proporción del recurso hídrico que escurre superficialmente por el río Colorado y alimenta en las zonas de recarga al acuífero regional.

En la cabecera de ambos ríos, sobre la zona cordillerana, el clima es frío (Halcrow, 2013), con una temperatura media anual que no supera los 10°C y precipitaciones en forma de nieve que fluctúan entre los 600 y 1.000 mm (en promedio) concentradas en la época invernal, con máximos en junio. Existe un marcado efecto de precipitación orográfica en toda la cuenca del río Colorado. En el extremo occidental, en la zona de alta montaña, alcanza los 1.100 mm, luego en la estación Los Mayines (1672 m.s.n.m) disminuye a los 523 en y 400mm en Bardas Blancas (1454 m.s.n.m), hasta descender hasta los 200 mm en la zona de Buta Ranquil (821 m.s.n.m), aguas abajo de la confluencia de los ríos Grande y Barrancas que al unirse dan origen al río Colorado.

En esta zona dominan los paisajes irregulares compuestos por valles profundos, elevados cordones montañosos sobre los que se imponen volcanes; y de manera subordinada hacia el oriente, serranías más bajas en las cuales se observa un severo control estructural en el diseño de los sistemas fluviales y las formas del relieve (Halcrow, 2013). Sobre la parte baja de las subcuencas prevalecen los paisajes de topografías suavemente onduladas y tabulares de poca inclinación, que solamente son

interrumpidos por estructuras volcánicas que se superponen sobre estas formas del relieve, en algunos casos abarcando extensos territorios.

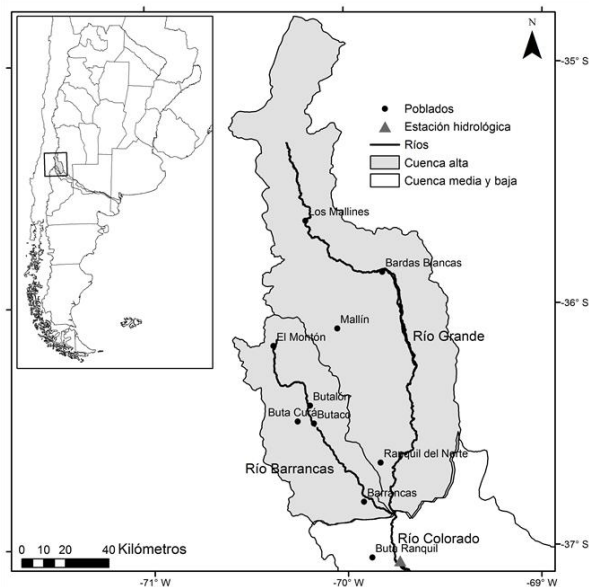


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Cuenca alta del río Colorado: subcuencas del río Grande y río Barrancas.

El área de estudio corresponde a las regiones fitogeográficas de Estepas Altoandinas y la ecorregión de Estepa Arbustiva Patagónica (Daniele & Natenzon, 1994). La primera se ubica en zonas de alta montaña de la cordillera andina y presenta vegetación herbácea y pajonales y vegas de juncáceas en dirección al sur. La segunda, se localiza sobre el área media y desembocadura de ambas subcuencas, con estepa arbustiva en las laderas montañosas y herbáceas en los faldeos y lomadas suaves de los valles con influencia de monte (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública & COIRCO 2013).

Materiales y métodos

La información acerca de la elevación del terreno fue obtenida de datos digitales procedentes del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (2000) a través de National Aeronautics and Space Administration (NASA). Las imágenes SRTM fueron obtenidas de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (<http://srtm.usgs.gov/index.php>), las cuales poseen una resolución espacial de 90 metros, radiométrica de 16 bit y formato geotiff (Farr et al., 2007). El SRTM permitió la construcción de un modelo digital de elevación (MDE).

A partir del MDE en cada subcuena se trazó un perfil longitudinal, siguiendo un eje en cada subcuena desde la cabecera hasta la desembocadura, y perfiles transversales representativos de los relieves, los cuales proporcionaron información para definir la dirección general del escurrimiento superficial. Se esquematizó tres perfiles transversales para cada subcuena, uno en cabecera, uno en la parte media y uno en la desembocadura, que varían en su tamaño dependiendo de la distancia entre las divisorias de agua de cada sección.

Para el cálculo de los parámetros e índices se utilizaron el software Global Mapper 18, SAGA 2.1.2 (System for Automated Geoscientific Analises), ArcGIS 10.1 (ESRI) y planillas de cálculo. Los parámetros e índices morfométricos calculados para cada subcuena fueron:

Parámetros e índices de forma.

Se calculó el perímetro (P), expresado en km, que es la medición de la línea envolvente de la cuena hidrográfica, por la divisoria de aguas; el área de drenaje (A), definida como la superficie encerrada por la divisoria de aguas, en km²; el ancho promedio (Ap), determinado por la relación entre la superficie de la cuena con su longitud axial expresado, en km; la longitud axial (La) que es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuena (km) y el coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc), que relaciona el perímetro de la cuena con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente a la cuena ($Kc = P / 2 \sqrt{\pi A}$) (adimensional). A partir del ancho promedio y la longitud axial, se calculó el factor de forma (IF) (adimensional) e indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y manifiesta la tendencia de la cuena hacia las crecidas. También se calculó la razón de elongación (Re), mediante la fórmula propuesta por Schumm (1956) $Re = (1,129 \times A^{0,5})/L$. Re es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área (A) que la de la cuena y la longitud máxima de la misma (L). Los valores de Re inferiores a 1 implicarán formas alargadas, cuanto menor sea Re más alargada será la forma de la cuena

Parámetros de relieve.

Para cuantificar el efecto del relieve se determinó la altura media (AM), que expresa la altura definida por el volumen de la cuena en relación a la superficie de la misma (m) y se calculó la pendiente media (PM) mediante la ecuación de $PM = (Hmax - Hmin) / La$ siendo Hmax la altura máxima y Hmin la altura mínima para cada una de las subcuenas bajo estudio. El análisis se completó con la determinación de clases para la altura, pendiente, y orientación del terreno. Según Llamas (1993) la orientación de laderas hace referencia a la dirección geográfica con respecto al norte geográfico, considerando la pendiente general de las laderas de las subcuenas. Para cada parámetro se generaron cuatro clases con intervalos iguales. Además, se obtuvieron las curvas hipsométricas (CH) para cada subcuena. Las mismas representan el área relativa en cada altura (metros sobre el nivel del mar, m.s.n.m) de cada subcuena. Las CH fueron realizadas a través de información extraída del histograma de frecuencias de altimetría del MDE. Además, se generó un histograma de altimetría

que representa el área acumulada por piso altitudinal. Para ello se crearon 39 clases de altura, desde 800 a 4.700 m.s.n.m para la subcuenca del río Barrancas y 41 clases de altura para la subcuenca del río Grande, desde 800 a 4.900 m.s.n.m, y se calculó el área para cada clase.

Parámetros e índices de drenaje.

Se determinó el número de orden de los cursos mediante el método Strahler (1964), el cual asigna el orden 1 a un curso que carece de tributarios, orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1 y orden 3 es formado por la confluencia de dos de orden 2. El orden de una cuenca de drenaje está dado por el curso de orden mayor. El número de orden de los cursos de agua o jerarquización, está estrechamente relacionado con el número de ramificaciones de la red de drenaje. Para crear las redes de drenaje de forma automática, se especificó un umbral con la cantidad de píxeles adyacentes que constituyen una corriente. En nuestro caso, se utilizó un valor límite de 500 píxeles de acumulación (si hay más de 500 píxeles que desembocan en él se parte de la red de corriente).

Para cada subcuenca se calculó la densidad de drenaje (Dd) expresada en km/km², definida como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua (Ln) que drenan en la cuenca con respecto al área de la misma ($Dd = L_n / A$). Se calculó también, la longitud del curso principal (L) en km; desnivel de cauce (DH) expresado en metros, y pendiente media del cauce (J), como el cociente entre DH / L , la cual relaciona el desnivel con la longitud de su cauce principal. Además, se estimó el tiempo de concentración (Tc) que expresa el tiempo (horas) que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. Existen fórmulas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca (Tc), por ejemplo, la fórmula definida por Dirección General de Carreteras de España, que establece que $T_c = 0,3 (L / J 0.25) 0,76$, establecida a partir de la longitud del cauce principal y su pendiente media.

Resultados y discusión

La subcuenca del río Grande presenta una diferencia de altura de 2.190 m.s.n.m. entre su nacimiento y desembocadura en una distancia de 222 km, con orientación predominante norte-sur (Figura 2). En la cabecera y parte media de la subcuenca, la altura está por encima de los 1.500 m.s.n.m., con máximo de 2.984,5 m.s.n.m., siendo una zona montañosa con fuertes pendientes (16-30°). En cambio, en la porción del curso inferior, la altura disminuye por debajo de los 1.000 m.s.n.m., especialmente en los últimos 15 km (Figura 3), llegando a un mínimo de 909,9 m.s.n.m.

Por su parte, la subcuenca del río Barrancas presenta una diferencia de altura entre la nacimiento y su desembocadura de 1.808 m.s.n.m. en 96 km (Figura 2). En el último tramo del río Barrancas, aproximadamente 25 km antes de su desembocadura, la pendiente es menor (0-15°), con alturas por debajo de los 1.250 m.s.n.m., con un mínimo de 924 m.s.n.m.

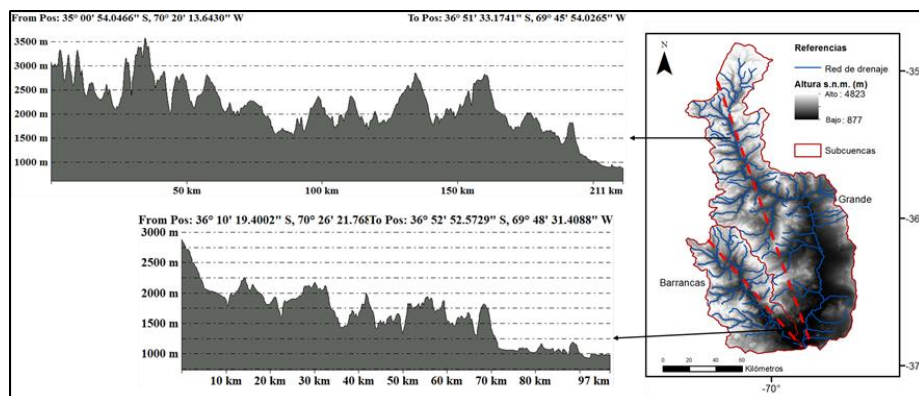


Figura 2. Perfiles longitudinales de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

En la cabecera y parte media superior de la subcuenca del río Grande hay mayor frecuencia de los cursos de agua (Figura 3), ya sean cursos permanentes o temporarios al observar el perfil transversal de estas secciones. Los principales afluentes del río Grande, que nacen allí son los ríos Cobre, Santa Elena, Valenzuela, Chico, Poti Malal, y Tordillo, y varios arroyos.

Los perfiles transversales de la subcuenca del Barrancas se observan en la Figura 3, uno en la cabecera (35, 6 Km), uno en la parte media (45,6 km) y uno en la desembocadura (38,5 km). Los puntos indican los cursos de agua, donde los principales afluentes son: arroyo Puente de Tierra, Butamallín, Domuyo, Butacó y Chadileo.

En ambas subcuencas se puede observar que la rugosidad del terreno disminuye en forma longitudinal como transversal a medida que se avanza hacia las desembocaduras. El cauce de los ríos principales en la cabecera de ambas subcuencas es encajonado, y a medida que recorre las subcuencas aguas abajo, su planicie de inundación es más ancha (Figura 3).

Parámetros e índices de forma.

El río Grande tiene una longitud de 351 km hasta confluir con el río Barrancas, encerrando un área de drenaje de 10.405 km², con dirección predominante hacia el sur, de forma encajonada, con un perímetro de 701,7 km. Por su parte el río Barrancas tiene una longitud de 109 km hasta confluir con el río Grande, con un área de drenaje de 3.544 km² y un perímetro de 329,5 km. Su curso se orienta en dirección sur-sureste

hasta la laguna Carri-Lauquen, a partir de la cual retoma su curso por un cañón angosto hasta unirse con el río Grande.

A partir de los valores de K_c obtenidos (Tabla 1), superiores a 1,5 (clase III) se interpreta a la subcuenca del río Barrancas como oval-oblonga y a la subcuenca del río Grande como forma rectangular oblonga, siendo ésta última menos susceptible a las crecidas, debido al retardo en la contribución de la escorrentía hacia el cauce principal.

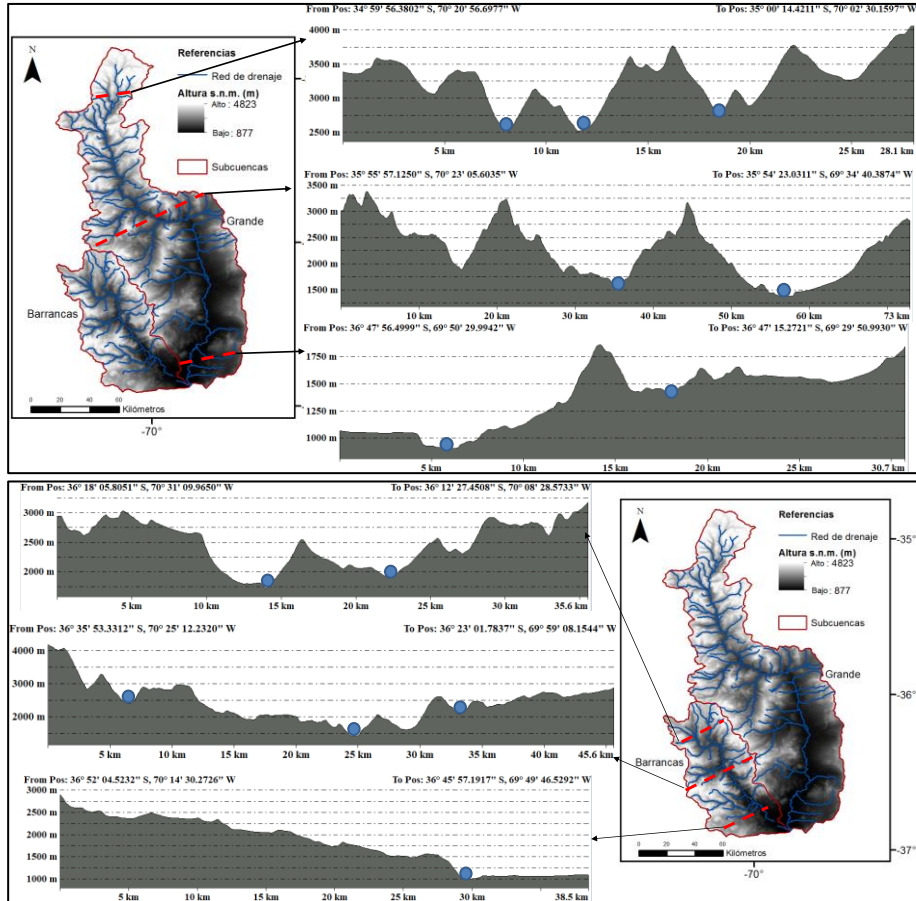


Figura 3. Perfiles transversales de la subcuenca del río Grande (arriba) y del río Barrancas (abajo). Los puntos indican la confluencia de los principales ríos afluentes.

| Subcuenca | Ancho medio (Ap) (km) | Longitud axial (La) (km) | Coef. de compacidad Gravelius (Kc) | Factor de forma (IF) | Razón de elongación (Re) |
|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Grande | 44,6 | 223 | 1,94 | 0,19 | 0,52 |
| Barrancas | 32,3 | 109,8 | 1,56 | 0,29 | 0,61 |

Tabla 1. Parámetros de forma.

Parámetros de relieve.

La cuenca del río Grande presenta una cota máxima de 4.823 m.s.n.m. en la divisoria superior, y mínima de 878 m.s.n.m. en la desembocadura, con una altura media (AM) de 2.850 m.s.n.m. A partir de los derivados de elevación, pendiente y orientación, se realizó una reclasificación por rangos (Figura 4).

El 53,7 % de la superficie del Grande se encuentran entre las cotas de 1.500 y 2.500 m.s.n.m., presentando un 2 % de la superficie, cotas por encima de 3.500 m.s.n.m. (Figura 4). Una gran parte de la subcuenca (64,6 %) presenta pendientes entre 0-15%, que se ubican en la zona centro y este. En cambio, sobre el sector noroeste se encuentran las áreas de fuerte pendientes (30,5% de la superficie), entre 16 y 30°, donde se presentan también las mayores elevaciones (Figura 4). Respecto a la orientación, el 22 % de su superficie presenta una orientación noreste y el 25 % noroeste, sumando ambas orientaciones, alrededor del 47 % de la superficie de la subcuenca tiene orientación norte, la cual recibe mayor cantidad de radiación solar, mientras que el 53 % de las laderas están orientadas al sur o a umbría (Figura 4).

Por su parte, en la subcuenca del río Barrancas la cota máxima alcanza los 4.664 m.s.n.m., y su cota mínima los 877 m.s.n.m., con una altura media (AM) de 2.770 m.s.n.m. Un 50 % de la subcuenca se encuentra entre 1.500 y 2.500 m.s.n.m (Figura 4), con menos del 1% de superficie con cotas por encima de los 3.500 m.s.n.m., que se ubican en el noreste, al límite con la subcuenca del Grande, y al suroeste. Respecto a la pendiente cabe destacar que el 57 % de la superficie posee pendientes entre 0-15%. Sobre el sector noroeste se encuentran las áreas de mayor pendiente, entre 16 y 30°, donde se presentan también las mayores elevaciones. Sólo el 7% de la superficie de esta subcuenca presenta pendientes en el rango de 31 a 45°. En relación a la orientación, el 28% de la superficie de las laderas tiene orientación noreste y el 27% sureste.

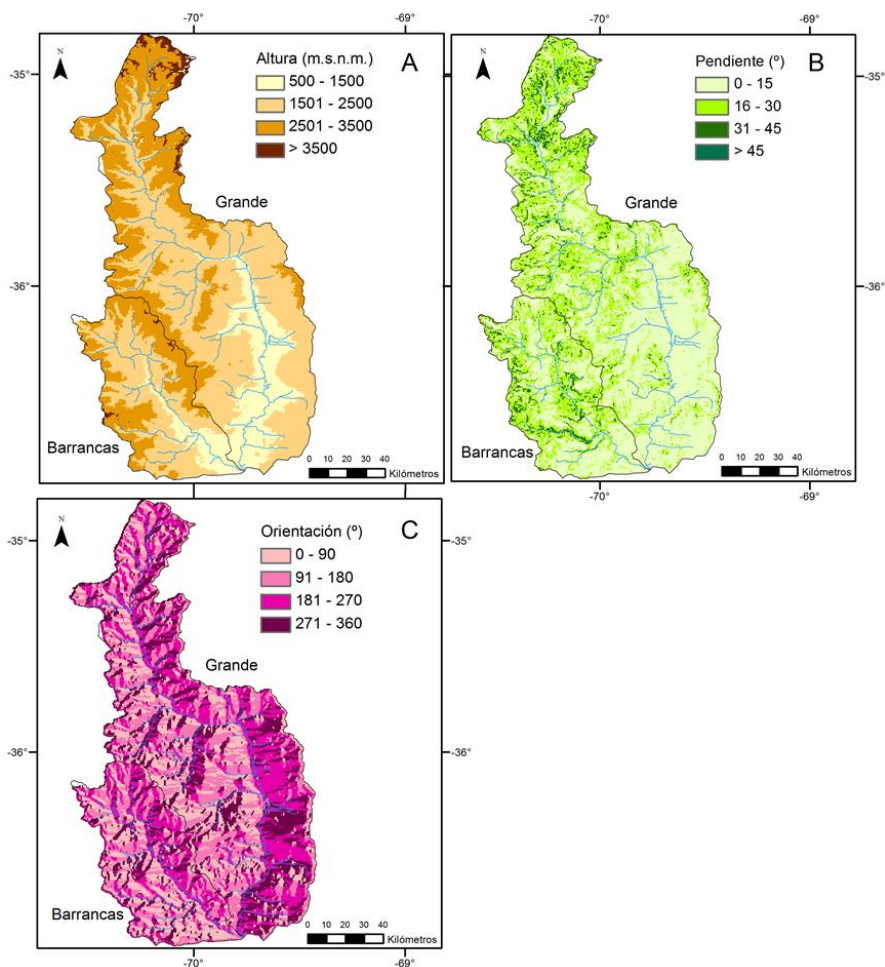


Figura 4. Caracterización de altura (A), pendiente (B) y orientación (C) de laderas de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas. Se representa la red de drenaje de órdenes 3, 4 y 5.

Las curvas hipsométricas representan la proporción del área según las cotas altimétricas para cada subcuenca. En ellas puede observarse la variación entre curvas expresando las diferencias, tanto de altitudes, como de relieve presentes en la cuenca.

Las curvas hipsométricas (CH) de cada subcuenca indican el porcentaje de área por encima de cada cota, en el caso de la subcuenca del río Grande el 50% se encuentra

por encima de los 2.100 m.s.n.m. (Figura 5), y en la subcuenca del río Barrancas el 50% está por encima de los 2.350 m.s.n.m. (Figura 5). Ambas subcuencas tienen semejanza en la forma de la curva, a pesar que tienen una distribución de alturas diferente, principalmente entre 1350 a 2650 m.s.n.m. En este rango de alturas, la subcuenca del río Barrancas presenta una mayor proporción del área.

La curva hipsométrica relativa de la cuenca (Figura 5) se encuentra entre las curvas B y C propuestas por Strahler (1952), encontrándose en fase de equilibrio con tendencia a la madurez.

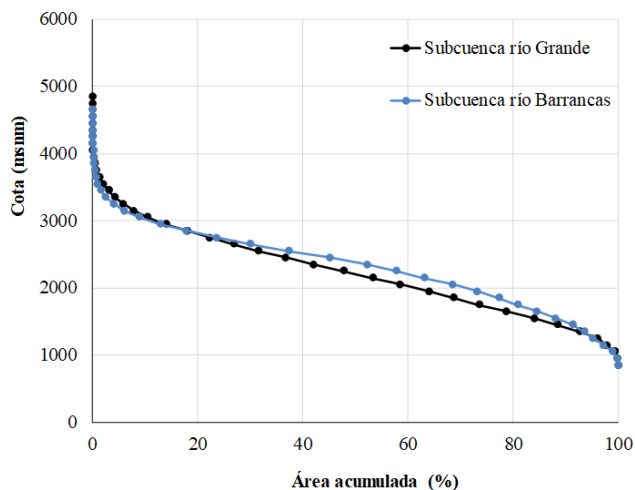


Figura 5. Curvas hipsométricas de las subcuencas del río Grande (negro) y de la subcuenca del río Barrancas (azul).

Las curvas hipsométricas permiten conocer la distribución del área de cada subcuenca a distintos niveles topográficos. En la Figura 6 se presenta la distribución de la altimetría desde los máximos hasta los 800 m.s.n.m. El río Grande desarrolla mayor área de drenaje, desde los 800 a los 2.900 m.s.n.m., con una superficie total de 9.205 km² que representa el 88,5 % de la subcuenca, con máximo de superficie (535,7 km²) desde los 2.300 a 2.400 m.s.n.m. En la subcuenca del Barrancas, la mayor superficie se da entre los 2.400 y 2.500 m.s.n.m, con 274,1 km². Sobre los pisos altitudinales superiores a 2.900 m.s.n.m las diferencias de superficie entre ambas subcuencas son menores que hacia las cotas más bajas.

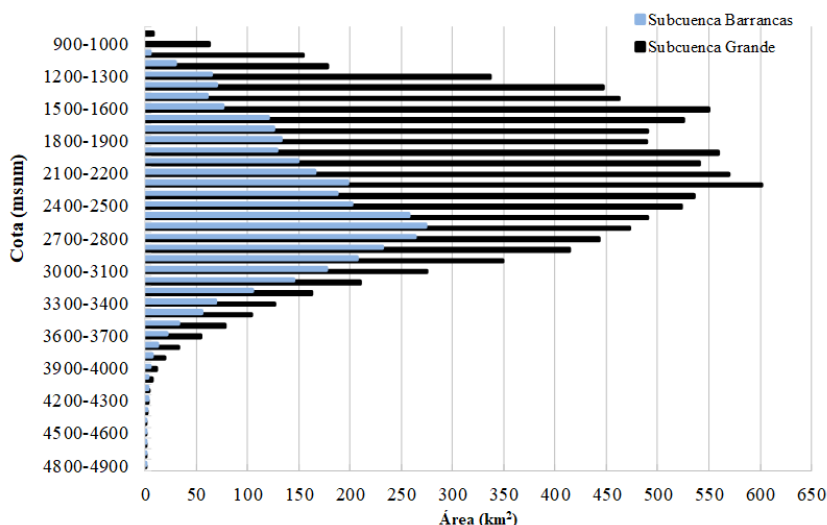


Figura 6. Frecuencias altimétricas. Las barras indican el área entre cada intervalo de cotas en la subcuenca del río Grande y del río Barrancas.

Parámetros e índices de drenaje.

La red de drenaje corresponde a un sistema dendrítico en ambas subcuencas (Figura 7). El número de orden máximo de los cursos de agua o jerarquización es cinco para las subcuencas en estudio. Al sudeste del río Grande se observa un área con gran densidad de cursos de agua de orden 1 y 2. Los mismos tienen una disposición rectilínea hacia el cauce principal. En esta zona, las pendientes son menores a 15°, por ello la resolución espacial del MDE puede ser limitante en este caso y originar algún tipo error.

Los resultados de los parámetros e índices de la red de drenaje calculados se presentan en la Tabla 2. El valor de Dd alcanzado para la subcuenca del río Grande fue de 0,44 (km/km²) y para el río Barrancas de 0,41 (km/km²). La longitud del río Grande es tres veces superior a la del río Barrancas, con un área de drenaje que sigue las mismas relaciones. Una diferencia a destacar entre las subcuencas se encuentra en el desnivel del cauce y la pendiente media, dado que el Barrancas posee mayor desnivel entre nacimiento y desembocadura, en un área drenada menor que la subcuenca del río Grande. Por lo tanto, durante las tormentas de alta intensidad en la subcuenca del Barrancas se generaría mayor actividad torrencial. Existe proporcionalidad entre la relación área-longitud de las subcuencas, así como también el Tc.

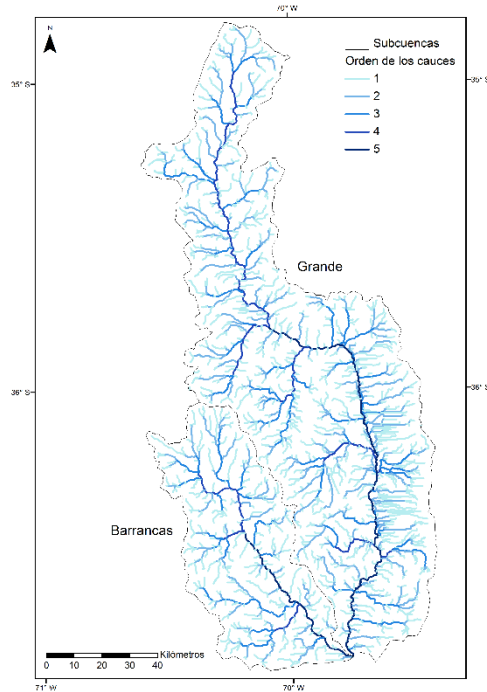


Figura 7. Jerarquización de la red de drenaje de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas.

| Subcuenca | Longitud del curso principal (L) (km) | Desnivel del cauce (DH) (m) | Pendiente media del cauce (J) (%) | Longitud de todos los cauces (Ln) (km) | Tiempo de concentración (Tc) (horas) |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| Grande | 351 | 1.089 | 3,10 | 4.629,9 | 19,9 |
| Barrancas | 109,2 | 1.539,8 | 14,12 | 1.454,7 | 5,8 |

Tabla 2. Parámetros e índices de la red de drenaje.

Conclusiones

El presente trabajo constituye una descripción de la morfometría de las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, inédita hasta el momento. La aplicación

de la metodología permitió definir parámetros e índices que describen el terreno de las subcuencas, a partir de las imágenes de SRTM, siendo la pendiente y orientación los primeros derivados del MDE. Las principales diferencias entre las subcuencas bajo estudio son el área de drenaje, la altura media y el desnivel del cauce, que tendrían consecuencia directa en sus áreas de aporte y tiempo de concentración. Si se consideran ambas subcuencas, la mayor superficie se desarrolla entre los 1.500 y 2.500 m.s.n.m., con pendientes predominantes entre 0 – 15°.

Este estudio ofrece importante información de base para posteriores investigaciones de modelado de la dinámica espacio temporal del caudal en las subcuencas. La importancia de estudiar estas subcuencas radica en que constituyen los afluentes del río Colorado. En sus áreas de drenaje se determina la escorrentía superficial generada a partir de la acumulación de nieve durante cada invierno. Actualmente, se está investigando acerca de la dinámica espacio temporal de la cobertura de nieve, para lo cual un estudio morfométrico del área resulta esencial. Por otra parte, resulta interesante completar este trabajo con estudios de geomorfología y litología del área de estudio.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por proyectos de INTA (PAMSL-1282103 y PNNAT-1128024). A su vez el INTA financió la beca de doctorado de Carolina Aumassanne.

Bibliografía

- Ardiansyah Prima, O.D.; Echigo, A.; Yokoyama, R. & Yoshida, T. (2006). Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 78, 373-386.
- Bayona Celis, A.; Rivera Sánchez, E.; Valtierra, J.G.; Martínez Reséndiz, W.E. & Montoya Martínez, A. (2006). Caracterización de los ecosistemas, cambios en el uso del suelo y unidades paisajísticas en la reserva de la biósfera “Sierra Gorda” de Querétaro. Reporte Técnico, Tomo XII, Llata Gómez, R. coord., Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, México.
- Bolongaro-Crevenna, A.; Torres-Rodríguez, V.; Sorani, V.; Frame, D. Y Ortiz, M.A. (2005). Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology*, 67, 407-422.
- Boninsegna, J.; Llop, A. (2015). Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. Santiago de Chile, CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 161., pp. 1-67.
- Busnelli, J; Horta, L. R. (2014). Morfometría de cuencas montañosas y metamorfosis fluvial, Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 71 (1): 11-20.
- Castillo, E. B.; Chichiple, M. E. & Salas López, R. (2017). Comparación de los MDE ASTER Y SRTM en el análisis morfométrico de la cuenca del Utcubamba (Perú). *Indes*, 3, 86-98.

- Clennon, J.A.; Kamanga, A.; Musapa, M; Shiff, C. & Glass, G.E. (2010). Identifying malaria vector breeding habitats with remote sensing data and terrain-based landscape indices in Zambia. *International Journal of Health Geographics*, 9, 1-13.
- COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). (2014). Programa Integral de Calidad de Aguas del Río Colorado – Calidad del Medio Acuático. Informe Técnico. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado, Secretaría de Energía de la Nación, Grupo Interempresario. (Consulta: 10-02-2016). www.coirco.com.ar
- Cuomo, A. & Guida, D. (2010). Orographic barriers GIS-based definition of the Campania-Lucanian Apennine Range (Southern Italy), poster session Complex System in Geomorphology, *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU General Assembly, Vienna. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-5846.pdf>
- Daniele, C. L. & Natenzon, C. E. (1994). Las regiones naturales de la Argentina: caracterización y diagnóstico. En: *El Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas de la Argentina. Diagnóstico de su patrimonio natural y su desarrollo institucional*. Buenos Aires, APN; pp 1-34
- Drăguț, L. & Blaschke, T. (2006). Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81, 330-344.
- Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D. & Alsdorf, D. (2007): “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Geophysics*, 45, 21- 22.
- Felicísimo, A. (1994) Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Gaspari, F. J.; Senisterra, G. E.; Delgado, M. I.; Rodríguez Vagaría, A. & Besteiro, S. (2010). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Ed. Gaspari. La Plata, Argentina, pp. 321.
- Gaspari, F. J.; Vagaría, A. M. R.; Senisterra, G. E.; Denegri, G.; Delgado, M. I. & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Comité del Medio Ambiente AUGM DOMUS*, 4, 43–158.
- Gaspari, F. J.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Senisterra, G. E.; Delgado, M. I. & Besteiro, S. I. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de La Plata-Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, pp. 188.
- Germaine, M. A.; Puissant, A.; Lespez, L. & Ballouche, A. (2006) *Analyse spatiale et typologie des petites vallées bas-normandes*, SAGEO’2006, Strasbourg, France, pp. 1-12.
- Halcrow, (2013). Cuenca del río Colorado determinación de áreas de riesgo hídrico. Programa Multisectorial de preinversión III. Préstamo BID 1896/OC-AR. Comité Interjurisdiccional del río Colorado. Hidroestructuras S.A.
- Lauro, C.; Vich, A. & Moreiras, S.M. (2016). Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Geoacta* 40 (2): 28-51.

- Lascano, M. (2005). Análisis interanual de la estacionalidad de los ríos Andinos. *Contribuciones Científicas*, 17:185-200
- Llamas J. (1993). Hidrología general: principios y aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España: 635 p.
- Montoya Moreno, Y. & Montoya Moreno, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la Quebrada de los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. *Revista Ingenierías*, 8 (15), 1-29.
- Sánchez Serrano, F.; Tejero López, R. & Bergamín De La Vina, J.F. (1998). Análisis de la variabilidad del relieve a partir de modelos digitales del terreno. *Revista Sociedad Geológica de España*, 11, 139-149.
- Schumm, S.A. (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Peareth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 597-646.
- Senisterra, G. E., Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F. J. & Mazzucchelli, M. G. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(2), 287-303.
- Sharma, A.; Tiwari, K. N. & Bhadoria, P. B. S. (2009). Measuring the Accuracy of Contour Interpolated Digital Elevation Models”, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37, 139-146.
- Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública y Comité Interjurisdiccional del río Colorado. (2013). Diagnóstico integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado, pp. 238. scripts.minplan.gov.ar/octopus/archivos.php?file=2656
- Strahler, A. (1952). Hypsometric (area-altitud) analysis of erosional topography. *Bulletin of Geological Society of America*, 63, 1117- 1142.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, section 4-2, in V.T. Chow (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, 4-39.
- Tagil, S. & Jenness, J. (2008). GIS-based automated Landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8, 910-921.
- Weiss, A. (2001). Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation. ESRI User Conference San Diego, CA, USA. www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf
- Wise, S. M. (2000). “Assessing the quality for hydrological applications of digital elevations models derived from contours”, *Hydrological Processes*, 14, 1909-1929.