

Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico

Nelso DOFFO¹ y Gustavo González BONORINO²

¹Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba E-mail: ndoffo@exa.unrc.edu.ar

²Departamento de Geología, Universidad Nacional de Salta-CONICET, CP (4400), Salta. E-mail: bonorino@ciunsa.edu.ar

RESUMEN. En base a un análisis estadístico de los principales parámetros morfométricos, se hace una caracterización hidrológica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas. En particular se discute la influencia de la estructura y litología sobre el diseño de la red de drenaje. La cuenca alta del arroyo Las Lajas drena una superficie aproximada de 41 km² y se desarrolla sobre un basamento plutónico-metamórfico del Precámbrico-Paleozoico superior. El relieve está conformado por serranías bajas, valles de fondo plano, con relleno aluvial y coluvial. La precipitación media anual es de 860 mm. La forma de la cuenca está parcialmente controlada por la Falla Las Lajas. Los parámetros morfométricos utilizados son: densidad de drenaje, frecuencia de cursos de primer orden, rugosidad de la cuenca, relación de bifurcación, relación de longitudes y relación de elongación. Estos se aplicaron a subcuencas de tercer orden, agrupadas en un sector oriental y otro occidental, delimitados por la Falla Las Lajas. De cada parámetro medido se obtuvieron estadísticos de posición y de dispersión y se realizaron, previa prueba de normalidad y de correlación, tests estadísticos, análisis de agrupamiento y factorial. El resultado no demuestra que exista un control litológico sobre el diseño de la red de drenaje. Un análisis de agrupamiento sobre las subcuencas indica una división en dos conjuntos que no muestran una relación obvia con la estructura ni la litología del sustrato.

Palabras clave: *Cuenca de drenaje, Morfometría, Córdoba, Fluvial.*

ABSTRACT. *Morphometric characterization of the mountainous Las Lajas Creek drainage basin, Cordoba.* The Las Lajas Creek mountainous drainage basin is characterized through the analysis of morphometric parameters, with the main purpose of studying the possible control of substrate lithology and structure on the drainage pattern. The basin drains an area of approximately 41 km², on a Precambrian-upper Paleozoic plutonic-metamorphic substrate. The basin lies in an area of moderate-elevation ranges, and planar valleys filled with alluvial and coluvial deposits. The basin is controlled by the active Las Lajas Fault. Morphometric parameters studied are: drainage density, frequency of first order streams, bifurcation relation, stream length relation, and elongation relation. These parameters were computed for third-order subwatersheds in the Las Lajas Creek basin to test the hypothesis that substrate lithology controlled drainage morphometry. The statistical analysis failed to demonstrate this hypothesis. Cluster analysis indicates a grouping of subwatersheds in two major sets that do not show obvious relations to either structure or lithology of the substrate.

Key words: *Drainage basin, Morphometry, Córdoba, Fluvial*

Introducción

En este trabajo se hace un análisis estadístico de la organización del drenaje en una cuenca de alta montaña: el tramo superior del arroyo Las Lajas, departamento Río Cuarto, Córdoba (Fig. 1). El arroyo Las Lajas nace en las sierras de Comechingones y confluye con el arroyo Santa Catalina luego de un recorrido de aproximadamente 100 km. La cuenca alta del arroyo Las Lajas está comprendida entre cotas de 750 m y 1200 m s.n.m., topográficamente por encima del quiebre de pendiente que la separa de la cuenca media. La cuenca alta cubre un área de 41 km² en el ámbito de la provincia geológica de Sierras Pampeanas, sobre un sustrato de un basamento plutónico-metamórfico del Precámbrico-Paleozoico inferior. El relieve actual de las sierras de Comechingones se desarrolló durante los movimientos ándicos en el Cretácico-Terciario, a partir de una amplia superficie de erosión de la que

hoy sólo quedan algunos relictos en sectores cumbrales. El ambiente serrano está conformado por una alternancia de valles poco profundos, de fondo plano, con un importante relleno aluvial y coluvial, presumiblemente de edad holocena. La precipitación media anual en esta área es de 860 mm, con régimen torrencial en los meses de verano.

La cuenca alta del arroyo Las Lajas está estructuralmente controlada por la Falla Las Lajas, una falla inversa de alto ángulo de rumbo N30°E, cuya traza aproximadamente coincide con el eje de la cuenca. Esta falla fue reactivada durante los movimientos terciarios y tiene evidencias de actividad neotectónica (Sagripanti 1999; comun. pers. 2002). La litología del sustrato es contrastante a un lado y otro de la Falla Las Lajas; al oeste dominan afloramientos de granitoides y al este de metamorfitas y mármoles, con asomos menores de ortogneises (Otamendi 1998). Varias fallas menores se agrupan en dos conjuntos principales de rumbo NNO y NNE (Fig. 2).

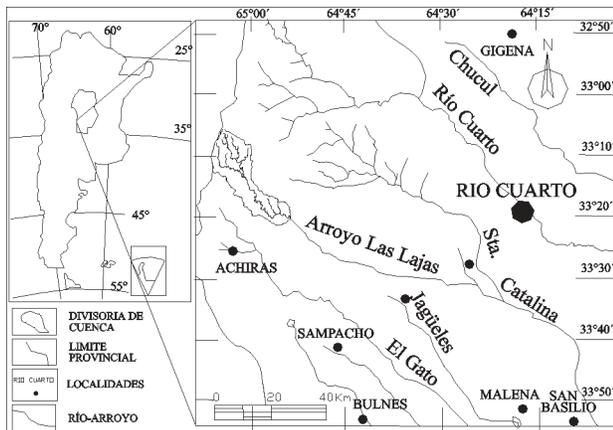


Figura 1: Mapa de ubicación de la cuenca alta del arroyo Las Lajas.

El análisis morfométrico de cuencas de drenaje ha recibido escasa atención en la Argentina, a juzgar por la aparente escasez de trabajos publicados sobre ese tema (e.g. Guido y Busnelli 1996). En este contexto la presente contribución da una base sólida para la discusión de la morfometría de cuencas de drenaje en la Argentina.

El presente estudio tiene dos propósitos. Uno es caracterizar la cuenca alta del arroyo Las Lajas en base a varias de sus características morfológicas y determinar si la conspicua segmentación estructural y litológica en el sustrato de la cuenca se refleja en la organización de la red de drenaje. El otro es explorar el significado estadístico de varios índices morfométricos de uso común.

Metodología y definiciones

La morfometría pretende hallar parámetros que sirvan para caracterizar un ambiente geomorfológico y que, además, sean susceptibles de un tratamiento estadístico o matemático que permita disminuir la influencia de la subjetividad en las conclusiones que se deriven de esos parámetros. En particular, la morfometría de cuencas de drenaje ha reunido un conjunto numeroso de parámetros que representan propiedades inherentes al sistema fluvial. Horton (1945), Schumm (1956) y Strahler (1957) fueron pioneros en la caracterización morfológica cuantitativa de cuencas de drenaje.

Strahler (1957) propuso una clasificación de cursos fluviales basada en la organización de los tributarios, de modo que un curso de orden 1 carece de tributarios, uno de orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1, uno de orden 3 es formado por la confluencia de dos de orden 2, y así siguiendo. Como corolario el orden de una cuenca de drenaje está dado por el curso de orden mayor. En este esquema la cuenca alta del arroyo Las Lajas es de orden 6. Para el análisis de la organización del drenaje en esta cuenca se delinearon las subcuencas de orden 3, obteniéndose 51 subcuencas, distribuidas 24 en el sector sudoccidental (subcuencas 1 a 14) y 27 en el nororiental (subcuencas 25 a 51) (Fig. 3). De cada subcuenca se midió el área, la cota topográfica máxima en la

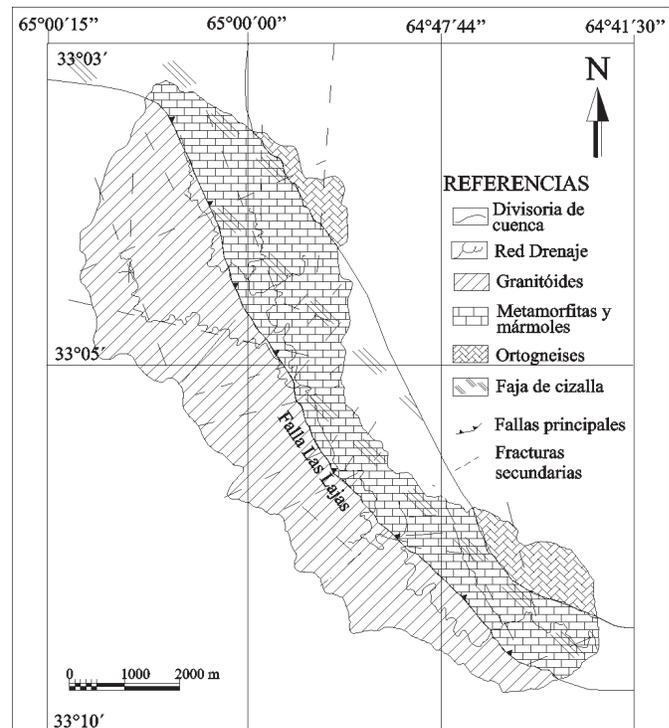


Figura 2: Mapa geológico de la cuenca alta del arroyo Las Lajas.

divisoria de aguas ($Alt_{M\acute{a}x}$), la cota topográfica en la desembocadura a la cuenca media ($Alt_{M\acute{i}n}$), la longitud entre la desembocadura y la divisoria de aguas en dirección aproximadamente paralela al curso de orden 3 (Long.) y por último, se calculó la sumatoria de las longitudes y el número de los cursos de orden 1 y separadamente, de órdenes 2 y 3 (Cuadro 8; las longitudes están expresadas en km y las áreas en km^2).

Estos datos fundamentales para el cómputo de los parámetros morfométricos fueron obtenidos de las siguientes fuentes.

- La divisoria de cuenca principal fue digitalizada de las cartas topográficas del IGM, La Punilla, Hoja 3366-23-2 y La Barranquita, Hoja 3366-24-1, con una equidistancia de 50 m.
- La red de drenaje se digitalizó de un mapa a escala 1:20.000 basado en fotografías aéreas.
- Las divisorias de las subcuencas fueron dibujadas sobre el mapa de la red de drenaje empleando las hojas topográficas del IGM.
- La planimetría se basó en una imagen LANDSAT TM georeferenciada.

En el análisis de la cuenca alta del arroyo Las Lajas se emplearon varios parámetros morfométricos cuya constitución está dada en el cuadro 1 y cuyo significado se describe a continuación. La densidad de drenaje (Dd) es una expresión de la textura fluvial, o grado de disección de una cuenca. De modo general, Dd está gobernada por el tipo de precipitación, la densidad de la cubierta vegetal, la topografía y el tipo de suelo, entre otros factores. El valor de Dd puede variar de menos de 10 en áreas con predominio del escurrimiento subterráneo sobre el superficial, e.g. terrenos kársticos o de arena suelta y

Cuadro 1: Parámetros morfométricos computados para la cuenca alta del arroyo Las Lajas.

Parámetro	Fórmula	Elementos	Unidad
Densidad de drenaje	$Dd = L/A$	L : longitud total de los cursos de órdenes 1, 2 y 3; A : área de la cuenca	km^{-1}
Frecuencia de cursos de 1er. orden	$F1 = \Sigma NI/A$	NI : número de cursos de orden 1; A : área de la cuenca	km^{-2}
Rugosidad de cuenca	$Rd = Dd \times RR$	$RR = Alt_{max} - Alt_{min}$	km
Relación de bifurcación	$Rb = N_{n-1}/N_n$	N_n número de cursos de un orden dado; N_{n-1} número de cursos del orden inmediato inferior	adimensional
Relación de longitudes medias	$Rl = l_n/l_{n-1}$	l_n longitud promedio de los cursos de un orden dado; l_{n-1} longitud promedio de cursos del orden inmediato inferior	adimensional
Relación de elongación	$Relong = (2/L) \times (A/\pi)^{1/2}$	L largo de la cuenca; A área de la cuenca	adimensional

densa cubierta vegetal, a más de 100 en terrenos arcillosos impermeables (*badlands*) sin vegetación (Chorley *et al.* 1984). La frecuencia de cursos de primer orden (F1) caracteriza la capacidad de expansión de la red de drenaje y permite realizar inferencias acerca del estado de equilibrio de la red. La rugosidad de cuenca (Rd) vincula la densidad de drenaje con el relieve. Cuencas muy disectadas con bajo relieve presentan un índice de rugosidad similar a cuencas moderadamente disectadas y con alto relieve (Patton 1988).

La relación de bifurcación (Rb) describe un aspecto de la organización de la red. La relación de bifurcación media para cada subcuenca se obtuvo como promedio de las relaciones parciales: $(Rb_{12} + Rb_{23})/2$. En el esquema de Strahler (1957), el menor valor teórico de Rb es 2, y corresponde a dos tributarios y un colector. Una red de drenaje de tipo dendrítico tiende a valores altos de Rb, mientras que una de tipo paralelo, con

fuerte control estructural, puede dar valores próximos a 2. Los números de cursos de cada orden están relacionados por un factor geométrico y caen sobre una línea recta si se grafican respecto del orden en papel semilogarítmico. Esta relación se conoce como la ley de Horton de número de cursos.

La relación de longitudes medias (RI) por subcuenca se obtuvo como promedio de los valores parciales. La relación de elongación (Relong) es un parámetro de forma de la cuenca. Las sumatorias de las longitudes de los cursos para cada orden están relacionados geoméricamente y caen sobre una línea recta si se grafican en papel semilogarítmico. Esta relación se conoce como ley de Horton de longitud de cursos.

Los valores de los parámetros morfométricos calculados para la cuenca alta del arroyo Las Lajas están tabulados en el cuadro 9 y sus estadísticos fundamentales se dan en el cuadro 2.

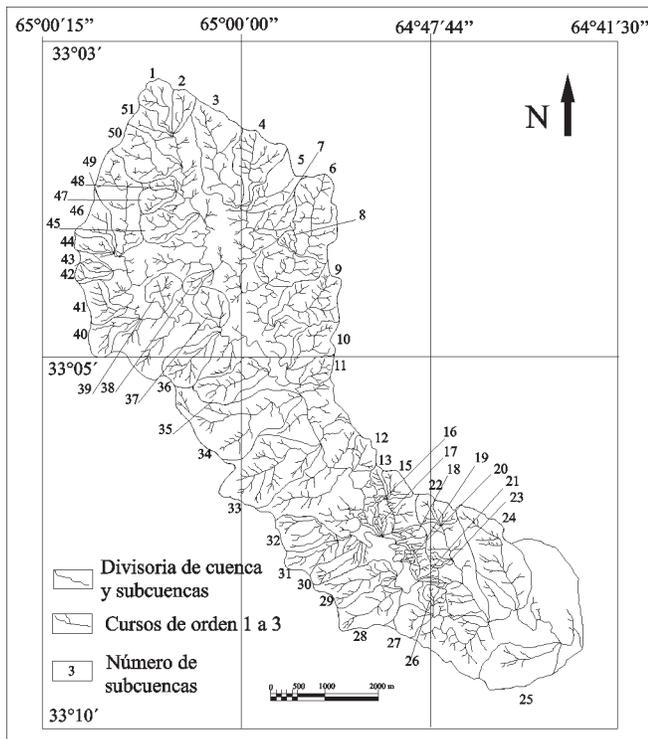


Figura 3: Red de drenaje y subcuencas de orden 3, en la cuenca alta del arroyo Las Lajas. Las subcuencas están numeradas correlativamente en el sentido de las agujas del reloj.

Análisis estadístico y resultados

La figura 4 muestra la relación semilogarítmica que existe entre el número de cursos de cada orden y la longitud total de cursos de cada orden respecto del orden de drenaje. La relación entre números de cursos es lineal y se ajusta bien a la ley de Horton de números de cursos, que predice una relación geométrica con factor aproximadamente igual a 3. La relación entre longitudes de cursos muestra un desvío que probablemente refleja una excesiva longitud de cursos de orden 3.

Prueba de normalidad y correlación

El primer paso en el análisis estadístico fue determinar si los parámetros morfométricos se adecuan a distribuciones normales y en caso contrario, si pueden transformarse para que lo hagan. Se empleó la prueba no paramétrica de Kolmogorov (Gibbons *et al.* 1992) que consiste en determinar D, (estadístico de la prueba) que da la separación mayor en porcentaje entre la curva acumulativa normal y la distribución empírica. En su forma original casi ninguno de los parámetros se ajusta a una distribución normal. En consecuencia, fueron transformados a lognormales (logaritmo neperiano) y normalizados y estandarizados (restados de la media y divididos por la desviación estándar). La estandarización hace que cada parámetro contribuya igualmente a la varianza total. Transformados de esta manera todos los parámetros se ajustan a una distribución normal, a juzgar por los resultados de una prueba de

Cuadro 2: Estadística de los parámetros morfométricos empleados; valores sin transformar.

Cuenca	Parámetro	Dd	Rd	F1	Relong	Rb	RI
Entera	Media	7,89	0,64	35,31	0,23	3,28	2,77
	Desv. est.	3,33	0,12	3,80	0,11	1,17	1,83
	Mínimo	2,62	0,09	7,39	0,09	2,00	0,79
	Máximo	20,66	6,08	179,37	0,64	6,50	9,60
Nororiental	Media	9,72	0,72	49,57	0,20	3,30	2,70
Sudoccidental	Media	6,57	0,59	24,44	0,25	3,28	2,88

Kolmogorov (Cuadro 3). Así, pues, es aceptable proseguir con el tratamiento estadístico empleando métodos paramétricos, generalmente más poderosos que los no paramétricos.

En el Cuadro 4 se dan los coeficientes de correlación de Pearson (Cox *et al.* 1974) para los parámetros morfométricos seleccionados, en su transformación lognormal y estandarizados. En general, la correlación entre pares de parámetros da valores bajos, lo cual sugiere que existe una débil interacción entre parámetros. La principal excepción se da entre F1 y Dd con un $r = 0,912$. Una alta correlación positiva entre estos dos parámetros es de esperar, sin embargo, ya que ambos miden, de modo diferente, la densidad del drenaje superficial. Se aprecia, además, una correlación positiva moderada entre Rb y RI que puede deberse a que la longitud de los cursos entra en el cómputo de Rb. Se optó por retener estos parámetros a pesar de su interacción por dos razones: éste es un estudio exploratorio y los parámetros seleccionados son de amplio uso en morfometría.

Comparación de muestras

La diferente litología a uno y otro lado de la Falla Las Lajas podría estar reflejada en los valores de los parámetros morfométricos. Para comprobar esta hipótesis se compararon las subcuencas de tercer orden a un lado y otro de la falla (Fig. 3). La prueba estadística consistió en determinar si existen diferencias significativas en los valores medios de los parámetros para cada grupo de subcuencas.

Se llevó a cabo una prueba de t (Student) para dos muestras independientes para cada par de parámetros. Previamente, la prueba de Levene (Montgomery 2000) para igualdad de varianzas demostró que Dd y F1 difieren significativamente en cada grupo (Cuadro 5, columnas 6 y 7, valores del estadístico

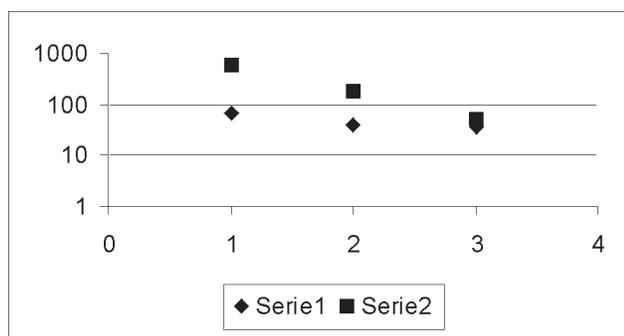


Figura 4: Gráfico de RI (Serie1) y de Rb (Serie 2) versus el orden de Strahler.

Cuadro 3: Prueba de Kolmogorov de ajuste a una distribución normal.

Ln_zDd	Ln_zRd	Ln_zF1	Ln_zRb	Ln_zRelong	Ln_zRI
0,13	0,09	0,15	0,11	0,14	0,08
Acepta	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta	Acepta

de Fisher, F, elevados, y un significado inferior a $\alpha = 0,05$; para estos dos parámetros, t se calculó suponiendo varianzas disímiles. La prueba de Student indica medias significativamente diferentes sólo para Dd y F1 (Cuadro 5, columnas 8 a 10); las medias de los demás parámetros no permiten discriminar entre subcuencas del sector oriental y del occidental.

Análisis de agrupamiento

Dado que la separación de las subcuencas en un grupo oriental y otro occidental, a primera vista atractiva, no parece ser natural, se exploró la posibilidad de que exista otro agrupamiento natural. Para ello se empleó el análisis de agrupamiento (*cluster analysis*) basado en una matriz de distancias euclidianas elevadas al cuadrado y el método de enlace de Ward. El resultado de este análisis está resumido en el dendrograma de la figura 5. El dendrograma sugiere una tendencia a la formación de tres a cuatro grupos a una distancia estadística de alrededor de 5 pero la reiteración de cálculos variando el método de enlace (*e.g.* simple, promedio) muestra que una división en más de dos grupos no es estable. Esta técnica dio por resultado un agrupamiento fuerte en dos conjuntos a una distancia estadística de alrededor de 19, uno formado por las 24 subcuencas 1, 4, 10, 11, 13, 21, 22, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 46, 47, 49, 50 y 51, y el otro por las 27 restantes. El 72% de las subcuencas del primer grupo corresponden al sector sudoccidental y el 63% de las del segundo grupo corresponden al sector nororiental.

Análisis factorial

El último paso en el análisis de los parámetros morfométricos del arroyo Las Lajas consistió en explorar la estruc-

Cuadro 4: Matriz de correlación.

Parámetro	ln_zRelong	ln_zDd	ln_zRd	ln_zF1	ln_zRb	ln_zRI
ln_zRelong	1,000					
ln_zDd	-0,029	1,000				
ln_zRd	-0,429	0,149	1,000			
-0,193	-0,230	0,912	-0,073	1,000		
ln_zRb	-0,009	-0,189	0,146	-0,193	1,000	
ln_zRI	-0,360	-0,142	0,427	-0,230	0,678	1,000

Cuadro 5: Prueba de Student para subcuencas orientales y occidentales.

Parámetro (ln z)	Grupo	N	Media	Desv. Estand.	Prueba de Levene		t	g.lib.	Signif. (2 colas)
					F	Signif.			
Relong	Oriental	24	0,15	1,18	2,43	0,13	0,98	49	0,32
	Occidental	27	0,13	0,81					
Dd	Oriental	24	0,50	1,06	8,60	0,005	3,75	39,2	0,001
	Occidental	27	0,45	0,70					
Rd	Oriental	24	0,22	0,89	0,92	0,34	-0,47	49	0,63
	Occidental	27	0,32	0,59					
Rl	Oriental	24	0,05	0,66	0,49	0,49	-0,52	49	0,60
	Occidental	27	0,04	0,55					
Rb	Oriental	24	0,05	0,71	0,42	0,52	0,43	49	0,67
	Occidental	27	0,04	0,81					
F1	Oriental	24	0,57	1,04	10,36	0,002	4,36	36,9	0,000
	Occidental	27	0,50	0,63					

tura de las variables mediante la técnica de análisis factorial (Krumbein y Graybill 196; Rock 1988). Esta técnica sirve para hallar aquellas combinaciones de parámetros que mejor expliquen la varianza total del sistema. El procedimiento consistió, primero, en obtener los valores *eigen* de la matriz de correlación por el método de Componentes Principales. Los valores *eigen* representan la varianza del sistema; su suma es igual a la suma de las varianzas de las variables, la cual por efecto de la estandarización es igual al número de variables, o parámetros, en nuestro caso igual a 6. El segundo paso consistió en retener sólo aquellos valores *eigen* que estén por encima de 1,00, con la premisa de que si un valor *eigen* vale menos de 1,00 es menos significativo que el parámetro original y, por lo tanto, conviene despreciarlo. Merced a esta selección se retuvieron tres valores *eigen*. Por último, se rotaron los ejes de coordenadas por el método *Varimax*, manteniendo la ortogonalidad, es decir, la independencia de los factores. La rotación de ejes busca maximizar la distribución de la varianza en cada factor. Así se obtuvieron los valores *eigen* que figuran en la columna "Total" del cuadro 6. Cada valor *eigen* explica una fracción de la varianza del conjunto de parámetros (columna "% de Varianza" del cuadro 6); el valor de esta fracción se obtiene dividiendo el valor *eigen* por la varianza total, i.e. 6. El valor acumulativo (columna "Acumulativa %" del cuadro 6) indica que los tres componentes retenidos dan cuenta de casi el 86% de la varianza total.

Finalmente, el cuadro 7 muestra la correlación entre los parámetros y los tres factores retenidos. Los valores en las celdas son los pesos (*loadings*) de los componentes. Se aprecia que el factor 1 tiene una alta correlación con Dd y F1, el factor 2 con Rb y Rl, y el factor 3 con Relong y Rd.

Interpretación

El análisis de agrupamiento y la comparación de medias indica que existe una tendencia de las cuencas de orden 3 a

Cuadro 6: Varianza explicada.

Componente	Total	% de Varianza	Acumulativa %
1	1,921	32,025	32,025
2	1,653	27,547	59,572
3	1,583	26,377	85,949

agruparse en dos conjuntos cuya clasificación respecto de las litologías dominantes es acertada entre el 63 y el 72% de los casos. El tercio restante está mal clasificado, lo cual signi-

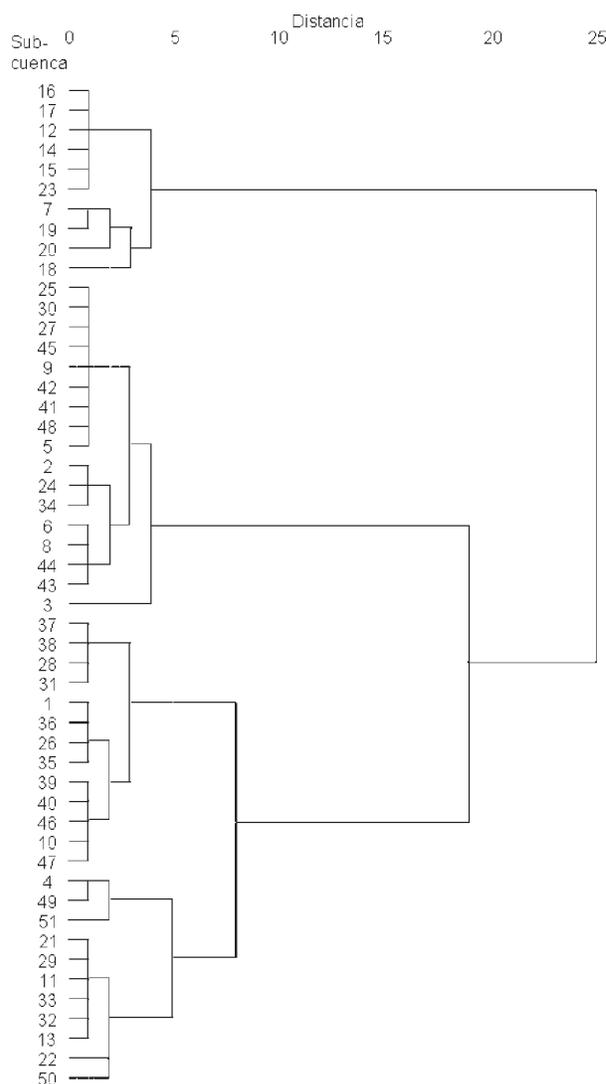


Figura 5: Dendrograma del análisis de agrupamiento jerárquico. Los números a la izquierda corresponden a la numeración de las subcuencas de tercer orden. En el dendrograma, el límite entre los dos grupos más estables pasa entre las subcuencas 3 y 37.

Cuadro 7: Matriz de tres componentes rotados según método Varimax.

Parámetro	Componente		
	1	2	3
ln_zRelong	5,802E-02	1,513E-02	-0,869
ln_zDd	0,975	-8,831E-02	0,107
ln_zRd	8,457E-02	0,226	0,794
ln_zF1	0,968	-0,111	-9,384E-02
ln_zRb	-0,101	0,948	-5,522E-02
ln_zRI	-0,116	0,826	0,415

fica que la agrupación no está enteramente controlada por la Falla Las Lajas y la litología del sustrato.

El análisis factorial indica que tres factores explican casi el 86% de la variancia del sistema. Cada factor está asociado a un par de variables. El factor 1, asociado a Dd y F1, combina longitud y número de cursos y daría cuenta del grado de disección de la superficie de la cuenca. El factor 2, asociado a Rb y RI, combina los dos parámetros que describen la organización de la red de drenaje. El factor 3 es más difícil de interpretar, ya que está asociado a un parámetro de forma, *Relong*, con un peso negativo y otro de disección o rugosidad de la cuenca, Rd. La asociación sugiere que cuanto más elongada sea una cuenca mayor será la tendencia a que tenga una alta rugosidad, lo cual podría estar reflejando un control estructural dado por las fallas menores. El análisis de esta posibilidad no pudo llevarse adelante debido a la falta de un mapa estructural definitivo para el área.

Conclusiones

Una conclusión de este estudio es que existen evidencias fuertes para suponer que la litología ejerció una influencia

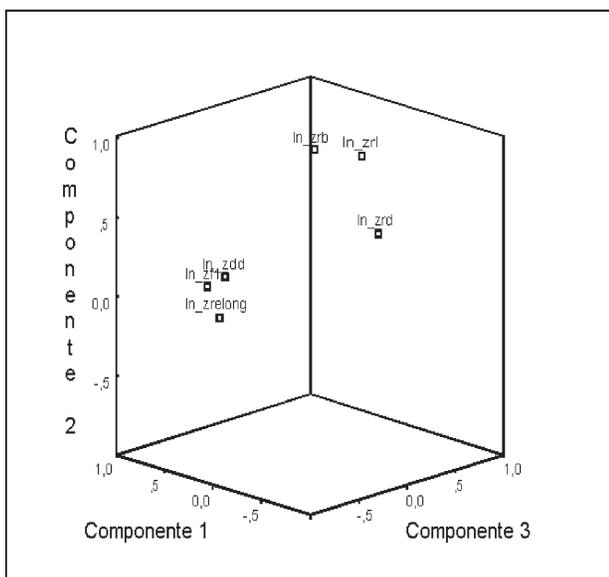


Figura 6: Gráfico de pesos (*loadings*) de cada parámetro morfométrico en coordenada dada por los factores extraídos de la matriz de correlación.

Cuadro 8: Mediciones fundamentales en subcuencas de orden 3 de la cuenca alta del arroyo Las Lajas.

Sub-cuenca	Area	Alt. Max.	Alt. Min.	Long.	Orden 1			Orden 2			Long. total cursos
					Long	Num	Long	Long	Num	Long	
1	0,25	1,26	1,08	0,83	0,85	6	0,30	2	0,46	1,61	
2	1,20	1,20	1,07	2,16	2,92	25	1,62	9	3,18	7,72	
3	0,75	1,70	1,07	2,16	2,36	20	1,66	7	3,18	7,20	
4	0,56	1,10	1,08	1,39	1,21	9	1,14	4	0,36	2,71	
5	0,35	1,10	1,05	0,97	0,88	12	0,69	3	0,51	2,08	
6	1,07	1,12	1,04	1,56	3,23	30	2,66	10	1,32	7,21	
7	0,09	1,10	1,04	0,43	0,51	6	0,35	2	1,03	1,89	
8	0,91	1,04	0,99	1,51	3,6	29	1,33	7	1,72	6,65	
9	0,50	1,03	0,98	1,31	1,83	11	0,39	2	1,03	3,25	
10	0,24	1,02	0,96	0,83	1,01	9	0,40	4	0,54	1,95	
11	0,23	0,96	0,93	0,66	0,97	9	0,51	3	0,34	1,82	
12	0,14	0,95	0,89	0,69	0,99	10	0,56	3	0,27	1,82	
13	0,20	0,94	0,89	0,55	0,93	6	0,35	2	0,14	1,42	
14	0,12	0,91	0,88	0,76	0,91	8	0,42	2	0,23	1,56	
15	0,06	0,92	0,88	0,41	0,35	5	0,25	2	0,16	0,76	
16	0,10	0,92	0,88	0,64	0,61	6	0,21	2	0,27	1,09	
17	0,10	0,92	0,88	0,58	0,62	6	0,19	2	0,30	1,11	
18	0,04	0,88	0,88	0,31	0,42	8	0,28	3	0,11	0,81	
19	0,19	0,91	0,87	0,63	1,39	12	0,67	4	0,23	2,29	
20	0,12	0,90	0,85	0,34	0,87	7	0,35	2	0,08	1,30	
21	0,18	0,95	0,92	0,69	0,57	5	0,44	2	0,17	1,18	
22	0,14	0,94	0,92	0,43	0,51	4	0,22	2	0,08	0,81	
23	0,08	0,91	0,88	0,46	0,36	5	0,37	2	0,20	0,93	
24	1,27	0,92	0,80	2,24	3,37	24	2,00	6	1,44	6,81	
25	0,39	1,26	1,08	1,03	1,08	10	0,73	3	0,83	2,64	
26	0,26	1,24	1,08	0,82	0,50	5	0,31	2	0,38	1,19	
27	0,75	1,24	1,08	1,46	1,80	15	1,32	4	1,31	4,43	
28	0,10	1,14	1,07	0,66	0,36	5	0,35	2	0,13	0,84	
29	0,23	1,12	1,07	0,73	0,67	5	0,39	2	0,35	1,41	
30	0,44	1,18	1,06	1,23	1,13	10	1,01	4	0,79	2,93	
31	0,14	1,12	1,05	0,68	0,47	5	0,40	2	0,28	1,15	
32	0,35	1,04	1,00	0,84	1,00	9	1,00	3	0,17	2,17	
33	0,31	1,07	1,05	0,74	1,31	11	0,44	3	0,43	2,18	
34	1,02	1,26	1,06	2,05	2,70	25	1,00	8	1,95	5,65	
35	0,36	1,20	1,08	1,20	0,75	6	0,58	2	0,44	1,77	
36	0,18	1,20	1,08	0,74	0,54	4	0,45	2	0,16	1,15	
37	0,14	1,11	1,07	0,71	0,57	4	0,31	2	0,16	1,04	
38	0,14	1,11	1,07	0,83	0,45	4	0,21	2	0,54	1,2	
39	0,39	1,20	1,06	1,06	1,84	9	0,50	3	0,38	2,72	
40	0,37	1,11	1,05	1,04	1,53	8	0,28	3	0,72	2,53	
41	0,57	1,06	1,00	1,29	2,00	14	1,16	4	0,89	4,05	
42	0,62	1,04	0,97	1,44	1,65	14	0,76	4	1,1	3,51	
43	1,77	1,06	0,96	1,76	4,06	27	1,77	4	2,41	8,24	
44	1,47	1,01	0,92	2,10	4,55	33	2,97	8	1,55	9,07	
45	0,54	1,00	0,90	1,21	1,44	10	1,39	4	1,2	4,03	
46	0,34	1,00	0,90	1,08	1,60	7	0,44	4	0,96	3	
47	0,33	0,97	0,89	1,16	1,05	10	0,44	4	0,96	2,45	
48	0,64	0,92	0,88	1,61	2,31	16	1,25	3	0,72	4,28	
49	0,66	0,92	0,87	1,37	1,84	11	1,29	2	0,25	3,38	
50	0,37	0,86	0,83	0,74	0,84	5	0,34	2	0,3	1,48	
51	0,95	0,94	0,78	1,62	1,12	7	0,47	2	0,89	2,48	

importante en la estructuración de la red de drenaje de tercer orden. El sector nororiental, dominado por rocas carbonáticas, se caracteriza por valores más elevados en la densidad de drenaje y número de cursos de primer orden (Cuadro 2).

La diversidad de parámetros morfométricos es grande. Existe por lo menos media docena de parámetros de forma. Cuál emplear, es una pregunta que seguramente no tiene respuesta

Cuadro 9: Parámetros morfométricos computados para la cuenca alta del arroyo Las Lajas.

Subcuenca	Dd	Rd	F1	Relong	Rb		RI	
					1-2	2-3	2-1	3-2
1	6,51	1,17	24,25	0,19	3,00	2,00	1,06	3,07
2	6,41	0,83	20,76	0,36	2,80	9,00	1,54	17,67
3	9,65	6,08	26,81	0,22	2,90	7,00	2,01	13,41
4	4,87	0,10	16,17	0,25	2,30	4,00	2,12	1,26
5	5,88	0,29	33,90	0,23	4,00	3,00	3,14	2,22
6	6,74	0,54	28,05	0,44	3,00	10,00	2,47	4,96
7	20,66	1,24	65,57	0,14	3,00	2,00	2,06	5,89
8	7,33	0,37	31,96	0,38	4,10	7,00	1,53	9,05
9	6,47	0,32	21,90	0,24	5,50	2,00	1,17	5,28
10	8,07	0,48	37,25	0,19	2,30	4,00	0,89	5,40
11	7,76	0,23	38,38	0,23	3,00	3,00	1,58	2,00
12	12,94	0,78	71,12	0,13	3,30	3,00	1,89	1,45
13	7,13	0,36	30,14	0,23	3,00	2,00	1,13	0,80
14	12,56	0,38	64,41	0,10	4,00	2,00	1,85	1,10
15	13,82	0,62	90,91	0,09	2,50	2,00	1,79	1,28
16	10,48	0,47	57,69	0,10	3,00	2,00	1,03	2,57
17	10,99	0,49	59,41	0,11	3,00	2,00	0,92	3,16
18	18,16	0,09	179,3	0,09	2,70	3,00	1,78	1,18
19	11,76	0,47	81,63	0,20	3,00	4,00	1,45	1,37
20	10,80	0,54	58,14	0,23	3,50	2,00	1,41	0,46
21	6,50	0,20	27,55	0,17	2,50	2,00	1,93	0,77
22	5,78	0,12	28,53	0,21	2,00	2,00	0,86	0,73
23	12,32	0,37	66,23	0,10	2,50	2,00	2,57	1,08
24	5,36	0,64	18,88	0,36	4,00	6,00	2,37	4,32
25	6,85	1,23	25,93	0,24	3,30	3,00	2,25	3,41
26	4,63	0,74	19,45	0,20	2,50	2,00	1,55	2,45
27	5,91	0,98	20,02	0,33	3,80	4,00	2,75	3,97
28	8,22	0,58	48,92	0,10	2,50	2,00	2,43	0,74
29	6,14	0,31	21,78	0,20	2,50	2,00	1,46	1,79
30	6,70	0,80	22,86	0,23	2,50	4,00	2,23	3,13
31	8,16	0,57	35,46	0,13	2,50	2,00	2,13	1,40
32	6,22	0,25	25,82	0,26	3,00	3,00	3,00	0,51
33	7,07	0,14	35,69	0,27	3,70	3,00	1,23	2,93
34	5,52	1,10	24,43	0,32	3,10	8,00	1,16	15,60
35	4,90	0,59	16,62	0,19	3,00	2,00	2,32	1,52
36	6,30	0,76	21,91	0,16	2,00	2,00	1,67	0,71
37	7,70	0,31	29,61	0,12	2,00	2,00	1,09	1,03
38	8,28	0,33	27,61	0,11	2,00	2,00	0,93	5,14
39	7,05	0,99	23,33	0,23	3,00	3,00	0,82	2,28
40	6,84	0,41	21,62	0,23	2,70	3,00	0,49	7,71
41	7,07	0,42	24,42	0,28	3,50	4,00	2,03	3,07
42	5,63	0,39	22,46	0,28	3,50	4,00	1,61	5,79
43	4,65	0,47	15,25	0,64	6,80	4,00	2,94	5,45
44	6,17	0,56	22,46	0,45	4,10	8,00	2,69	4,18
45	7,43	0,74	18,44	0,29	2,50	4,00	2,41	3,45
46	8,82	0,88	20,59	0,20	1,80	4,00	0,48	8,73
47	7,38	0,63	30,10	0,18	1,50	4,00	1,05	8,73
48	6,74	0,30	25,20	0,25	5,30	3,00	2,89	1,73
49	5,15	0,26	16,78	0,30	3,50	2,00	3,86	0,39
50	4,03	0,12	13,62	0,24	5,50	2,00	1,01	1,76
51	2,62	0,42	7,39	0,37	2,50	2,00	1,47	3,79

única. Una ventaja de los parámetros morfométricos es que pueden ser procesados estadísticamente. Sin embargo, muchos de ellos relacionan mediciones fundamentales similares, como por ejemplo el área, lo cual hace que queden más o menos correlacionados entre sí. El análisis estadístico debiera ser precedido por una inspección de la constitución de los parámetros a emplear para detectar aquellos más fuertemente interrelacionados y evitar que oscurezcan otras relaciones más significativas. El estudio morfométrico de la cuenca alta del arroyo Las Lajas demuestra la validez del enfoque cuantitativo, estadístico, para poner a prueba hipótesis de trabajo; en este caso, el posible control de la litología en el diseño de la red de drenaje. Y muestra también la complejidad del análisis

y la necesidad de acumular más información, minuciosamente analizada y evaluada, para avanzar en la caracterización de las cuencas de drenaje del noroeste de la Argentina.

Agradecimientos

Uno de los autores (G. Bonorino) agradece a la Universidad Nacional de Río Cuarto el apoyo brindado para visitas a esa institución.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Cox, D. R., y D. V. Hinkley, 1974. *Theoretical Statistics*. Chapman & Hall, London. 354-380.
- Chorley, R.J, Schumm, S.A y E. Sudgen, D:E. 1984. *Geomorphology*. Ed. Methuen & Co. Ltd., 316-340.
- Gibbons, J. D. y Chakraborti, S. C., 1992. *Nonparametric Statistical Inference*, Marcel Dekker, 256-369.
- Guido, E. y Busnelli M. 1993. Criterios morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de una cuenca hídrica (Río Las Cañas, Catamarca). 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), Actas 6: 116-122.
- Horton, R. E., 1945. Erosional development of stream and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56: 275-370.
- Krumbein, W.C. y Graybill, F.A., 1965. *An introduction to statistical models in geology*. McGraw-Hill Book Co., 475 pp., New York.
- Montgomery, D. C., 2000. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 156-168.
- Patton, P. 1998. *Drainage Basin Morphometry and Floods*. *Flood Geomorphology*. Eds. Baker, V., Kochel, C. y Patton, P. John Wiley & Sons, 51-64.
- Rock, N.M.S., 1988. *Numerical Geology*. Springer-Verlag, 425 pp., New York.
- Schumm, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67: 597-646.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed morphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38: 913-920.

Recibido: 20/09/03

Aceptado: 01/06/04