

## Caracterización de los parámetros morfológicos, de relieve e hidrológicos de la cuenca del río Vaqueros (Salta, Argentina) y su influencia en las crecidas

Ferreira Padilla Silvia E.<sup>1y2</sup>, Afranllie Mauro J.<sup>1</sup> y Ortega Lucrecia M.<sup>1y2</sup>

<sup>1</sup>CECRIM (Centro de Estudios de Cuencas y Ríos de Montaña), Facultad de Ciencias Naturales, <sup>2</sup>Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina.

Mail de contacto: [silferreira11@gmail.com](mailto:silferreira11@gmail.com)

### RESUMEN

La cuenca del río Vaqueros (139 km<sup>2</sup>) presenta relieve montañoso y pendientes pronunciadas en nacientes, y con tormentas extremas, se desencadenan crecidas periódicas. Se analizaron las características morfológicas, de relieve e hidrológicas, a fin de evaluar el comportamiento hidrológico. La forma la cuenca es alargada-cuadrada con salida lateral- rectangular oblonga (índice de compacidad de 1,54; factor de forma de Gravellius 0,23). Presenta altitud máxima de 3578 m.s.n.m.; pendiente media 33%, coeficiente orográfico 30, 114 cauces de orden 1; 53 cauces de orden 2, densidad de drenaje 0.98 km/km<sup>2</sup>, coeficiente de torrencialidad de 0,81(media a alta); frecuencia de drenaje (1,69); pendiente del cauce 6,9% y tiempo de concentración 180 minutos. Se encuentra en fase de no equilibrio (cuenca juvenil), relieve fuertemente accidentado, que generan escorrentía con velocidades importantes, con elevada susceptibilidad a la erosión y remoción en masa. Los procesos gravitacionales actúan intensamente en cabeceras, donde los cursos se continúan formando.

**Palabras claves:** cuenca, morfología, torrencialidad.

### ABSTRACT

The basin of Vaqueros's river (139 Km<sup>2</sup>) has mountainous relief and steep slopes in springs, and with extreme storms, it is triggered periodic floods. The morphological, relief and hydrological characteristics were analyzed in order to evaluate the hydrological behavior. The shape of the basin is elongated-squared with oblong lateral-oblong outlet (compactness index of 1.54, Gravellius form factor 0.23). Presents maximum altitude of 3578 m a.s.l.; average slope 33%, orographic coefficient 30, 114 channels of order 1; 53 courses of order 2, density of drainage 0.98 km / km<sup>2</sup>, torrentiality coefficient of 0.81 (medium to high); drainage frequency (1.69); the channel slope 6.9% and time of concentration 180 minutes. It is in a non-equilibrium phase (juvenile basin), a strongly rugged relief, which generates runoff with significant velocities, with high susceptibility to erosion and mass removal. Gravitational processes act intensely in headers, where courses continue to form.

**Keywords:** basin, morphology, torrentiality.

### Introducción

El análisis de los rasgos de la superficie terrestre se puede realizar de forma más sencilla y objetiva si se recurre a la geomorfometría o simplemente morfometría, ciencia que, aplicada a la geomorfología permite la cuantificación de

diferentes rasgos de la superficie terrestre y la comparación, en forma exacta, de una parte de la superficie terrestre con otra (Londoño Arango, 2001).

Las características morfológicas de una cuenca son muy importantes porque señalan la tendencia del comportamiento torrencial frente a las crecidas. Conocer

esas características, como la forma de una cuenca, permite relacionarlas con la susceptibilidad que puedan tener dichas cuencas a un mayor o menor peligro torrencial de crecidas o aluviones. La cuantificación de estos parámetros permite interpretar y predecir ciertos comportamientos hidrológicos y de torrencialidad en las cuencas hidrográficas. Las formas de la superficie terrestre se alteran sólo en el curso de lapsos geológicos, por lo cual, se puede considerar en la práctica, y con sólo algunas excepciones, que las magnitudes morfométricas son valores fijos y permanentes (Ferreira Padilla, 2019).

El objetivo de este trabajo es determinar los parámetros morfológicos, hidrológicos y de relieve de la cuenca del río Vaqueros, para relacionarlos con la respuesta hidrológica a las precipitaciones extremas.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El río Vaqueros ubicado en la provincia de Salta (Argentina), es un río de montaña que atraviesa de noroeste a sureste las Sierras de Lesser y Vaqueros, al oeste de la localidad homónima. Recorre alrededor de 33 km desde sus nacientes (3.578 ms.n.m.), bajando por la falda oriental de las Sierras de Lesser, hasta la confluencia con el río La Caldera (1.238 m.s.n.m.), a partir del cual continúa como río Mojotoro.



**Fig. 1.** Cuenca del río Vaqueros (Salta, Argentina). Mapa de red de drenaje.

El clima es subtropical serrano con estación seca, con lluvias principalmente estivales y heladas durante el invierno. La precipitación media anual es de 924 mm (Afranllie, 2019).

En la época de estiaje, los torrentes y pequeños cursos que descienden del faldeo sur de la Sierra de Vaqueros y norte de las Lomas de Medeiros alimentan el curso principal. El carácter del río Vaqueros es permanente pero el agua se infiltra paulatinamente hasta desaparecer unos 3 km antes del puente sobre la ruta nacional N° 9, esto se debe al ensanchamiento del valle y al aumento del espesor de los depósitos aluviales Gutiérrez (1995).

Se elaboraron en Sistema de Información Geográfica (SIG), mapas de Límites de la cuenca, red de drenaje (Figura 1), curvas de nivel (Figura 2), y número de órdenes, utilizando imágenes satelitales Áster y Sentinel, que fueron procesadas a través de un software de formato CAD. Se empleó el sistema de grillas nacionales POSGAR 1994 con elipsoide WGS 84 Argentina Faja 3, construyendo el DEM (Modelo de Elevación del Terreno); la escala de los mapas fue de 1:80.000.

Las características morfológicas influyen de manera decisiva en la respuesta hidrológica de la cuenca afectando los hidrogramas de escorrentía y las tasas de flujos máximos generados (Ferreira Padilla, 2019).

Las formulas matemáticas considerados para el análisis de los parámetros fueron desarrollados por Horton (1945), Stralher (1958), Schumm (1956) en Vich (1996), Mármol (2008), Ferreira Padilla (2019) y Ortíz Vera (2004) y se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Fórmulas empleadas para estimar las características morfológicas

|        |                                      |   |
|--------|--------------------------------------|---|
| Cuenca | $Rf = \frac{A}{L_a^2}$               | <b>Relación de Forma de Horton (Rf)</b> (Horton, 1932)<br>La: máxima longitud de la cuenca o longitud axial (Km)<br>A: área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) |
|        | $Kc = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$ | <b>Índice de Compacidad de Gravelius (Kc)</b> (Mármol, 2008)<br>P: Perímetro de la cuenca (Km)<br>A: área de la cuenca.                                     |

|                         |  |   |
|-------------------------|--|---|
|                         | $Rc = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$ | <b>Relación de circularidad (Rc)</b><br>(Miller, 1953)<br>A: área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )<br>P: perímetro de la cuenca (Km)   |
|                         | $Re = \frac{\sqrt{4A}}{L_2}$           | <b>Relación de elongación (Re)</b><br>(Mármol, 2008)<br>A: área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )<br>La: Longitud axial (Km)  |
|                         | $Ia = \frac{L_2}{A_{m\acute{a}x}}$     | <b>Índice de alargamiento (Ia)</b><br>(Mármol, 2008)<br>La: longitud axial (Km)<br>A máx: ancho máximo de la cuenca (Km)  |
|                         | $Ff = \frac{Ap}{La}$                   | <b>Factor de Forma o de Gravellius: (Ff)</b> (Mármol, 2008)<br>Ap: ancho promedio (km)<br>La: longitud axial (km)   |
| Parámetros de relieve   | $Jm = \frac{Hm\acute{a}x - Hmin}{L}$   | <b>Pendiente media del cauce principal (Jm)</b> (Mármol, 2008)<br>Hmáx: cota máxima (m)<br>Hmin: cota mínima (m)<br>L: longitud del cauce principal (m)   |
|                         | $Jmc = \frac{E \cdot Ln}{A} \cdot 100$ | <b>Pendiente media de la cuenca (Jm)</b> (Nania, 2003)<br>E: equidistancia entre curvas de nivel (km)<br>Ln: longitud entre cotas (km)<br>A: área de la cuenca (km <sup>2</sup> )               |
|                         | $Hmc = \frac{\sum Ai \cdot Hi}{A}$     | <b>Altitud media de la cuenca (Hm)</b> (Mármol, 2008)<br>Ai: Área entre par de cotas (km <sup>2</sup> )<br>Hi: Altitud media entre par de cotas (km)<br>A: Área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) |
|                         | $CM = \frac{Hm}{A}$                    | <b>Coefficiente de Masividad</b> (Martonne, 1940)<br>Hm: Altura media (m). Es la diferencia Hm – Hmin<br>A: Área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )  |
|                         | $CO = \frac{(Hm)^2}{A}$                | <b>Coefficiente Orográfico (CO)</b> (Fournier, 1960 en Mármol 2008)<br>CM: coeficiente de Masividad (adimensional)  |
|                         |  | <b>Relación de Bifurcación (Rb)</b> (Horton, 1945)<br>Nn: Número de cauces de orden n<br>Nn+1: Número de cauces de orden siguiente  |
| Parámetros hidrológicos | $Fc = \frac{Nn}{A}$                    | <b>Frecuencias de drenaje o cursos (Fc)</b> (Horton, 1945)<br>Nn: número de cauces de orden n<br>A: área total de la cuenca (km <sup>2</sup> )  |
|                         | $Dd = \frac{Lc}{A}$                    | <b>Densidad de drenaje (Dd)</b> (Horton, 1945)<br>Lc: longitud total de cauces (Km)<br>A: área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )  |
|                         | $C = \frac{1}{Dd}$                     | <b>Canal de alimentación (Ck)</b> (Mármol, 2008)<br>Dd: densidad de drenaje<br>A: área de la cuenca (Km <sup>2</sup> )  |
|                         | $Ct = \frac{N1}{A}$                    | <b>Coefficiente de Torrencialidad (Ct)</b> (Ollero Ojeda, 2.000)<br>Ct: Coeficiente de torrencialidad<br>N1: Número de cursos de 1° orden   |
|                         |  |   |

|   |   |
|---|---|
| $Tc = 0.02 \cdot (L)^{0.77} \cdot (S)^{-0.385}$ | <b>Tiempo de Concentración (Tc)</b> (Kirpich) (Mármol, 2008)<br>Tc: tiempo de concentración en min<br>L: longitud máxima del cauce principal (metros)<br>S: pendiente del curso en decimal. |
| $Tc = 0,3 \cdot (L/J)^{0.259} \cdot 0.76$       | <b>Tiempo de Concentración (Tc) de Temez.</b> CEDEX, España)<br>Tc: tiempo de concentración en minutos<br>L: longitud del cauce (km)<br>J: pendiente media del cauce en %                   |

Los valores de referencias para interpretar parámetros se detallan en Tablas 2-8.

**Tabla 1.** Valores de Rf para determinar la forma de la cuenca (Mármol, 2008).

| Rf    | Forma de la cuenca          |
|-------|-----------------------------|
| 0.785 | Circular                    |
| 1     | Cuadrado con salida central |
| 0.5   | Cuadrado con salida lateral |
| < 1   | Rectangular                 |

**Tabla 2.** Valores de Rf según Santander y Barrios (Ferreira Padilla, 2019).

| Valore de Rf aproximados | Forma de la cuenca        |
|--------------------------|---------------------------|
| <0.22                    | Muy Alargada              |
| 0.22 a 0.30              | Alargada                  |
| 0.30 a 0.37              | Ligeramente alargada      |
| 0.37 a 0.45              | Ni alargada ni ensanchada |
| 0.45 a 0.60              | Ligeramente ensanchada    |
| 0.60 a 0.80              | Ensanchada                |
| 0.80 a 1.20              | Muy ensanchada            |
| >1.20                    | Rodeando el desagüe       |

**Tabla 3.** Valores de Kc para determinar la forma de la cuenca (Mármol, 2008).

| Kc          | Clases de Forma                        |
|-------------|--|
| 1 – 1.25    | Casi redonda a oval redonda (compacta) |
| 1.25 – 1.50 | Oval oblonga                           |
| 1.50 – 1.75 | Rectangular oblonga                    |
| > 1.75      | Casi rectangular (alargada)            |

**Tabla 5.** Valores de índice de alargamiento según Junco (Afranllie, 2019).

| Ia        | Forma de la cuenca     |
|-----------|------------------------|
| 0 a 1.4   | Poco Alargada          |
| 1.5 a 2.8 | Moderadamente alargada |
| 2.9 a 4.2 | Muy Alargada           |

**Tabla 6.** Tipos de relieve dependiendo de las pendientes (Ortiz Vera, 2004).

| Pendiente media (%) de cuenca | Tipo de relieve |
|-------------------------------|-----------------|
| 0 - 3                         | Plano           |
| 3 - 7                         | Suave           |
| 7-12                          | Mediano         |
| 20-35                         | Accidentado     |
| 35-50                         | Fuerte          |
| 50-75                         | Muy fuerte      |
| 50-75                         | Escarpado       |
| > 75                          | Muy escarpado   |

**Tabla 4.** Clases de densidad de drenaje según Santander y Barrios (Afranllie, 2019).

| Dd       | Valor (km/km <sup>2</sup> ) |
|----------|-----------------------------|
| Baja     | <1                          |
| Moderada | 1 a 2                       |
| Alta     | 2 a 3                       |
| Muy alta | >3                          |

**Tabla 5.** Clases de densidad de drenaje según Strahler (Vich, 1996).

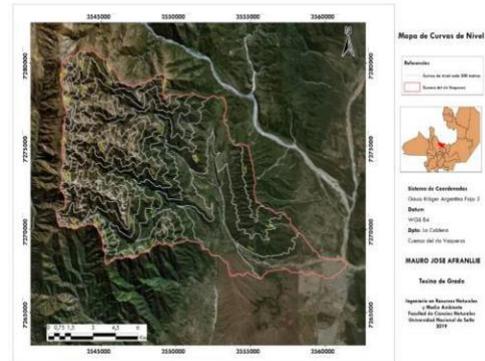
| Dd            | Valor (km/km <sup>2</sup> ) |
|---------------|-----------------------------|
| Gruesa (Baja) | < a 5                       |
| Media         | 5 a 13.7                    |
| Fina (alta)   | >13.7                       |

## Resultados y Discusión

La forma la cuenca del río Vaqueros (Tabla 9) presenta una superficie de 139 km<sup>2</sup>, perímetro de 64,96 km; factor de forma de Gravellius 0,23 y relación de forma de Horton 0,23 que indican que la cuenca tiene una forma alargada y cuadrada con salida lateral. Un Ff bajo y de forma alargada (0,23) indica que la cuenca es menos propensa a las crecidas, coincidiendo con el valor de Rf. El Índice de compacidad (Kc: 1,54) muestra que presenta forma rectangular oblonga, donde predomina la longitud sobre el ancho. En cuanto a relación de circularidad 0,41 y relación de elongación (0,54) la cuenca no es redondeada o compacta, sino alargada.

Con respecto al relieve (Tabla 10, Figura 2), presenta altitud máxima, media, mediana y mínima de 3578, 2081, 2116 y 1238 m.s.n.m. respectivamente; todos estos valores son elevados y existe un desnivel de 2340 m en 33 km de cauce, confirmando que se trata de una cuenca montañosa

con condiciones de relieve abrupto. La pendiente media de la cuenca de 33%, coeficiente de masividad 15 y coeficiente orográfico 30, confirman que es una cuenca muy montañosa de relieve accidentado. Las pendientes son pronunciadas, es una cuenca juvenil donde los procesos erosivos continúan actuando con las lluvias intensas.



**Fig. 2.** Mapa de Curvas de Nivel de la cuenca del río Vaqueros.

**Tabla 9.** Valores de los parámetros de forma del área de estudio.

| Parámetros de Forma                     | Valores |
|---|---------|
| A: Área de la cuenca (km <sup>2</sup> ) | 139     |
| P: Perímetro (km)                       | 64,96   |
| A máx: Ancho máximo (km)                | 14,74   |
| A medio: Ancho promedio (km)            | 5,62    |
| L máx: Longitud máxima o axial (km)     | 24,75   |
| Rf: Relación de Forma de Horton         | 0,23    |
| Ff: Factor de Forma o de Gravellius     | 0,23    |
| Kc: Índice de Compacidad                | 1,54    |
| Rc: Relación de Circularidad            | 0,41    |
| Re: Relación de Elongación              | 0,54    |
| Ia: Índice de Alargamiento              | 1,68    |

**Tabla 10.** Valores de los parámetros de relieve del área de estudio

| Parámetros de relieve              | Valores |
|------------------------------------|---------|
| Altitud Máxima m.s.n.m.            | 3578    |
| Altitud Media (Hm) m.s.n.m.        | 2081    |
| Altitud Mínima m.s.n.m.            | 1238    |
| Altitud mediana m.s.n.m.           | 2116    |
| Pendiente Media de la cuenca(Jm) % | 33      |
| Coeficiente Orográfico CO)         | 30      |
| Coeficiente de Masividad           | 15      |
| Pendiente media del cauce %        | 6,9     |

En cuanto a los parámetros hidrológicos (Tabla 11), presenta 114 cauces de orden 1

(48%); 53 cauces de orden 2 (23%), 39 de orden 3(17%), 30 de orden 4 (13%) y la jerarquía de la cuenca es de orden 4. La densidad de drenaje es  $0.98 \text{ km/km}^2$ , coeficiente de torrencialidad es de 0,81; frecuencia de drenaje (1,69); pendiente del cauce principal (6,9 %). La relación de bifurcación es: entre ordenes 1-2 (2,15), ordenes 2-3 (1,35) y ordenes 3-4 (1,3). El tiempo de concentración es entre 171 y 180 minutos, es decir 3 horas demora en llegar la crecida al punto de cierre de la cuenca. En episodios de crecidas se pueden evacuar a los pobladores mediante Sistema de Alerta Temprana conociendo el tiempo de concentración.

**Tabla 11.** Valores de los parámetros hidrológicos de la cuenca del río Vaqueros.

| Parámetros hidrológicos                           | Valores |
|---|---------|
| Área ( $\text{km}^2$ )                            | 139     |
| Número de cursos                                  | 236     |
| Longitud total de los cauces (km)                 | 136     |
| Densidad de Drenaje (Dd) $\text{km/km}^2$         | 0,98    |
| Frecuencia de Drenaje (km)                        | 1,69    |
| Canal de Alimentación ( $\text{km}^2/\text{km}$ ) | 1,02    |
| Coeficiente de Torrencialidad                     | 0,81    |

## Conclusiones

De acuerdo a la forma la cuenca es rectangular oblonga (alargada), donde la crecida tarda aproximadamente 3 horas desde las nacientes hasta desembocadura del río. Es una cuenca de relieve montañoso con grandes altitudes y pendientes pronunciadas (relieve muy accidentado), generando escorrentía con velocidades importantes. Presenta una elevada susceptibilidad a la erosión y remoción en masa. El río Vaqueros presenta un comportamiento torrencial con la probabilidad de generar procesos erosivos, y transporte de sedimentos durante las crecidas, tal como ocurrió en varios episodios como febrero de 2019.

Esta metodología es práctica para predecir el comportamiento hidrológico de las

cuenas, en especial las montañosas frente a las lluvias máximas.

## Referencias

- Afranllie, M. J. 2019. Estudio hidrológico y análisis granulométrico y litológico de los sedimentos de los ríos Lesser, Castellanos y Vaqueros (cuenca del río Vaqueros- Provincia de Salta) y sus características morfológicas. Tesina de grado Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Salta.
- Ferreira Padilla, S. E. 2019. Manejo de cuencas hidrográficas y técnicas de restauración en cuencas de montaña. Universidad Nacional de Salta.
- Gómez Espigares, E. J. 2003. Restauración Hidrológico – Forestal de la Cuenca del Embalse Las Cuevas de Almanzora. Anexo II. Descripción física de la cuenca. España.
- Gutiérrez, M.D. 1995. Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Rio Vaqueros. Dpto. La Caldera. Provincia de Salta. Tesis Profesional Escuela de Geología. Universidad Nacional de Salta.
- Londoño Arango, C.H. 2001. Cuencas Hidrográficas: Bases Conceptuales. Caracterización, planificación y Administración. Universidad de Tolima. Ibagué, Colombia.
- Mármol, L. A. 2008. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta.
- Ortíz Vera, O. 2004. Evaluación Hidrológica. En HIDRORED, Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía. Vol. 1/2004, ITDG. Perú.
- Vich, A. J. 1996. Aguas Continentales, Formas y Procesos. Hidrografía. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo (UNC), (CONICET).