

## HIDROLOGÍA

*Prof. Alejandro Delgadillo Santander*

*Prof. Ada Moreno Barrios*

### **MORFOMETRÍA DE CUENCAS**

#### **➤ ¿QUÉ ES LA MORFOMETRÍA DE CUENCAS?**

Es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y se utiliza para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos. Dentro de este contexto, es importante señalar que las mediciones deben ser realizadas sobre un mapa con suficiente información hidrográfica y topográfica.

La Morfometría de Cuencas resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños (Ruiz, 2001) con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados en pequeña escala a prototipos de gran escala (Chow *et al.*, 1994).

Otro aspecto interesante, reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, orientados o dirigidos a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socioeconómico motivan especial atención tanto a la hora de utilizar y ocupar el territorio, como en el momento de definir medidas de tipo estructural para el control de crecidas excepcionales. La morfometría de cuencas es igualmente denominada morfología de cuencas hidrográficas según Linsley *et al.* (1977) y geomorfología de la cuenca según Chow *et al.* (1994) aunque este último término no es del todo adecuado.

#### **➤ ALGUNOS ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

El estudio de las características morfométricas de una cuenca, fue iniciado originalmente por el padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos de Norte América: Robert Ermer Horton, a través de sus dos artículos de referencia internacional “Drainage basin characteristics” (1932) y “Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology” del año 1945 (justo un mes antes de su muerte). Los estudios morfométricos fueron transformados de diferentes análisis puramente cualitativos y deductivos, a estudios científicos, cuantitativos y rigurosos capaces de suministrar datos hidrológicos fáciles de estimar (Strahler, 1964).

En el año 1952, Arthur Newell Strahler, modificó y mejoró el sistema para el análisis de la red de drenaje propuesto originalmente por Horton (1945), donde se clasifican los ordenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y a la potencia de sus afluentes; convirtiéndose desde entonces en el sistema de clasificación más usado a nivel mundial, para ordenar las redes de los drenajes en cuencas hidrográficas y constituyéndose a su vez en un tema de estudio obligado para los cursos de hidrología básica y geomorfología fluvial, donde aborde el estudio de la morfometría de cuencas. De esta manera Horton y Strahler, se convirtieron en dos de los grandes

investigadores de la morfometría de cuencas, a pesar de la gran cantidad de autores que han escrito sobre el tema.

## ➤ PRINCIPALES PARÁMETROS FÍSICOS DE LA MORFOMETRÍA DE CUENCAS

### a) FORMA DE LA CUENCA

Uno de los índices más utilizados para medir la forma de la cuenca, es el factor o relación de forma de Horton, el cual viene expresado por:

$$Rf = \frac{A}{La^2}$$

Donde:

A: Área de la cuenca en km<sup>2</sup> medida con malla de puntos, planímetro o mediante software

La: Longitud axial expresada en km

*Nota: Los valores obtenidos a partir de este índice varían entre 0 y  $\pi$  ( $0 < Rf < \pi$ )*

En la figura 1, se muestra la relación entre la morfología de algunas cuencas y sus respectivos caudales pico. Para más información sobre algunas formas de las cuencas y sus respectivas respuestas hidrológicas se recomienda consultar a Smith y Stopp (1978)

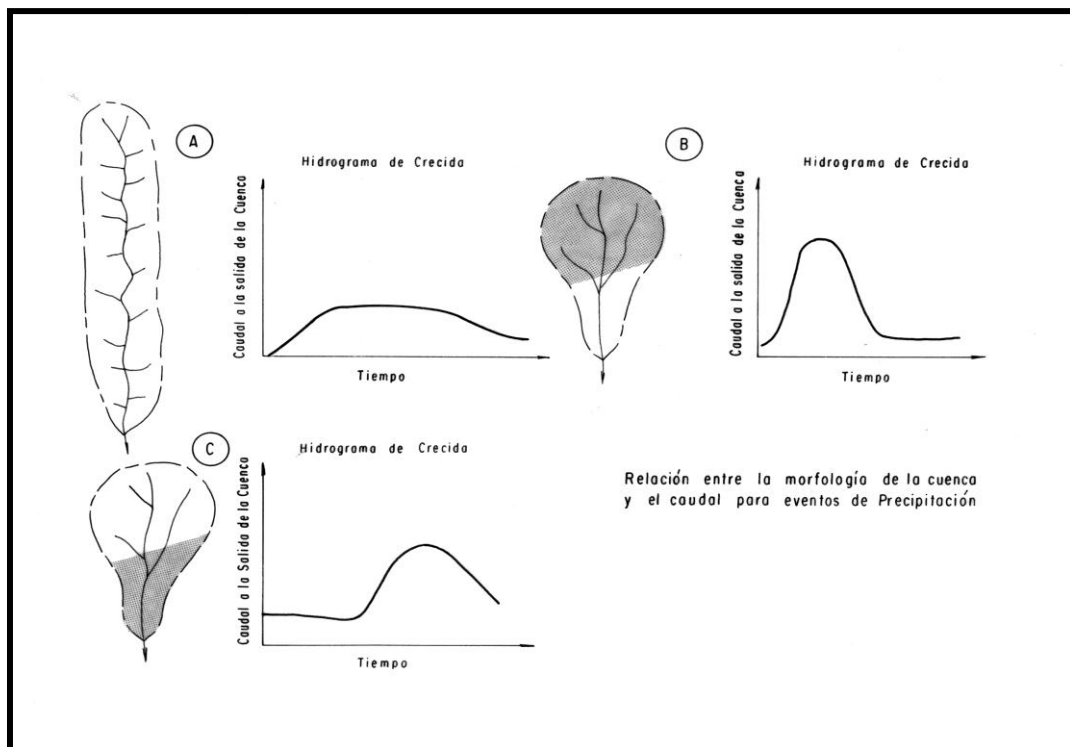


Figura 1. Relación entre la forma de algunas cuencas y el caudal pico para eventos máximos de precipitación.

Fuente: Bell (1999).

Los valores interpretativos de la relación de forma de Horton, pueden verse en el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores interpretativos del factor forma.

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
> 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.300	Alargada
0.300 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.450	Ni alargada ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente Ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 -1.20	Muy Ensanchada
> 1.200	Rodeando el Desagüe

Otros parámetros empleados para analizar la forma de la cuenca son: el coeficiente de circularidad de Miller (Cc) y el Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc).

El coeficiente de circularidad de Miller se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Cc = 4\pi \frac{A}{P^2}$$

Donde: A: Área de la cuenca en km<sup>2</sup>  
P: Perímetro de la cuenca en km

Es de hacer notar que el coeficiente de circularidad de Miller varía entre 0 y 1. En este caso, valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que unos coeficientes de circularidad cercanos a 0, indican que las cuencas son alargadas.

El coeficiente de compacidad representa la relación entre el perímetro de la hoya y el de una circunferencia de área igual a la cuenca. Este índice es estimado a través de la siguiente fórmula:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

El menor valor de Kc es uno, y corresponde a una cuenca circular. A medida que Kc aumenta, mayor es la irregularidad de la cuenca y su desviación de la forma circular (Guevara y Cartaya, 1991)

#### *¿Cómo influye la forma de cuenca en la escorrentía?*

En líneas generales, las cuencas más ensanchadas poseen mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas. Caso contrario ocurre con las cuencas alargadas donde el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, contribuyendo a que los picos de crecidas sean menos súbitos en caso de lluvias concentradas o tormentas.

**b) RED DE DRENAJE:**

- **Relación de Bifurcación (Horton / Strahler)**

Horton (1945) sugirió la jerarquización de cauces de acuerdo al número de orden de un río, como una medida de ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica, este sistema propuesto originalmente por Robert Horton, fue más tarde mejorado y ligeramente modificado por Strahler en el año 1964. A partir de dicha jerarquización de los cauces se puede obtener el valor de la relación o razón de bifurcación expresada por:

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Donde  $N_u$  = Numero de orden de cada cauce

¿Cómo influye la relación de bifurcación  $R_b$  sobre la escorrentía?

Para poder inferir posibles crecidas a partir de la  $R_b$ , se debe obtener la relación de bifurcación promedio. Así los valores de  $R_b$  bajos se asocian con cuencas muy bien drenadas que pueden generar a su vez crecidas más violentas (Figura 2)

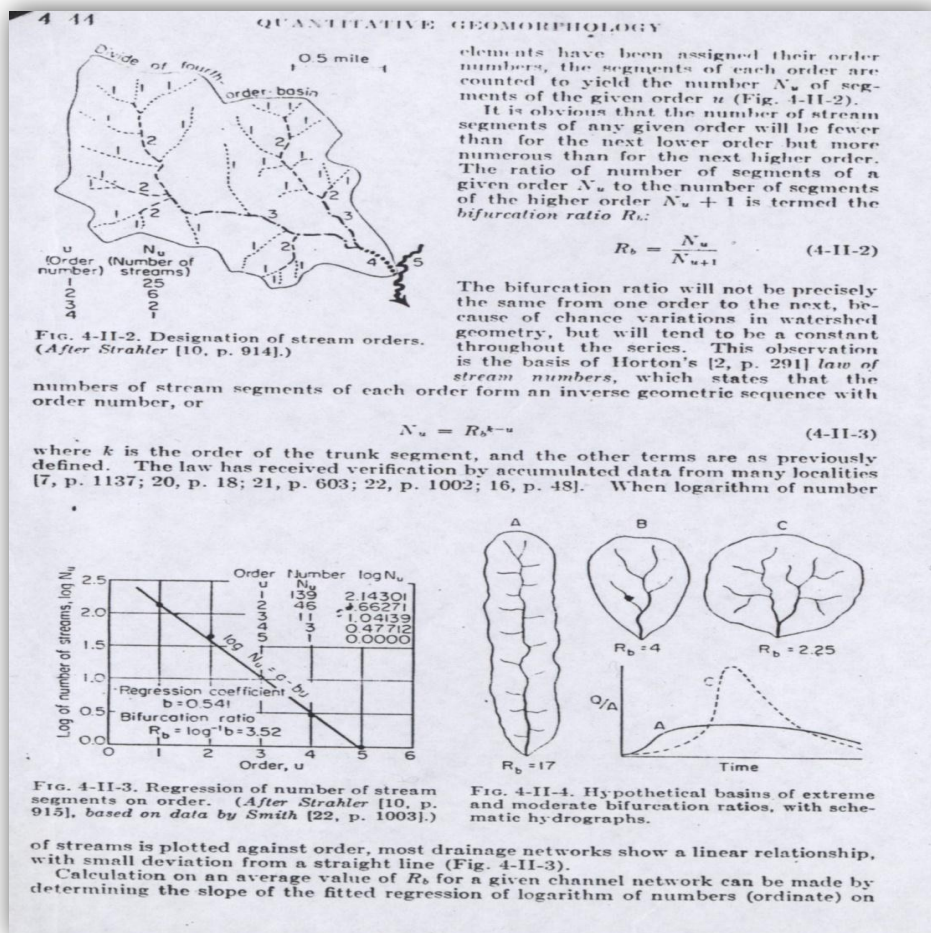


Figura 2. Relaciones de bifurcación y su respectivo caudal pico. Un  $R_b$  alto produce un pico bajo pero extendido tal y como se puede apreciar en el hidrograma de la figura 2; caso contrario ocurre con un  $R_b$  bajo.

- **Densidad de drenaje**

Es uno de los parámetros más importantes dentro de los estudios morfométricos y se define por:

$$Dd = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N l_{i,u} / A$$

Donde: D: Densidad de drenaje expresada en km/km<sup>2</sup>.  
 Li,u: Longitud total de todos los cauces en km  
 A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Los valores que permiten interpretar la densidad de drenaje, cuando se trabaja con mapas topográficos a escala 1:25.000 se pueden ver en el cuadro 2.

**Cuadro 2.** Valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente: Delgadillo y Páez (2008)

¿Cómo influye la densidad de drenaje en la escorrentía?

Generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con "materiales impermeables a nivel subsuperficial, vegetación dispersa y relieves montañosos" (Strahler A, 1964: 4-52) además de ello indica que la cuenca posee suficiente drenaje para cuando se presentan las tormentas. Una cuenca bien drenada generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel subterráneo, de allí que los acuíferos de estas regiones son de bajos rendimientos o en su defecto el volumen de recarga es muy pobre (Ruiz, 2001).

Por el contrario una densidad de drenaje baja refleja una cuenca "pobrementemente drenada con una respuesta hidrológica muy lenta" (Linsley 1977) igualmente sugiere materiales duros y resistentes desde el punto de vista litológico.

- **Longitud promedio del cauce de orden lu**

Es una propiedad dimensional que refleja el tamaño característico de los cauces y de las superficies de sus cuencas contribuyentes ya que los ríos largos implican mayor cantidad de afluentes y por supuesto el área superficial que ocupan es mayor, que para aquellos ríos de recorridos cortos (Ruiz 2001).

Para obtener la longitud promedio del cauce de orden u, se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\bar{l}_u = \frac{\sum_{i=1}^N l_{i,u}}{N_u}$$

$l_{i,u}$ : longitud de los cauces en Km  
 $N_u$ : Numero de orden

### c) PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL Y PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

En la medida en que los valores de ambos parámetros se incrementan mayor será la posibilidades de generar crecidas, ya que la capacidad de arrastre de sedimentos y la velocidad del caudal en caso de tormentas se incrementa en aquellas cuencas que presenten valores altos de pendientes, caso contrario ocurre cuando la pendiente media del cauce principal y la pendiente media de la cuenca presentan valores bajos, los cuales contribuyen a que los picos de crecidas sean menos violentos.

La pendiente media de la cuenca se calcula por el método de Alvord (Guevara y Cartaya 1991 y Ruiz, 2001), el cual se muestra a continuación:

$$S_c = \left( \frac{\sum l_i * eq}{A} \right) 100$$

Donde  $S_c$ : pendiente media de la cuenca

$\sum l_i$ : Sumatoria de todas las longitudes de las curvas de nivel en Km

$eq$ : Equidistancia entre curvas en Km. Por ejemplo en un mapa a escala 1:25.000 la equidistancia será igual 0,1 Km; debido a la separación de las curvas cada 100 metros

$A$ : Área de la cuenca ( $km^2$ )

Los valores interpretativos de la pendiente media de una cuenca se pueden ver en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Característica cualitativa del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente

Pendiente media (%)	Terrenos
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Pérez (1979)

Finalmente la pendiente media del cauce principal se calcula a partir de:

$$S = \sum DV / DH * 100 \quad \text{ó} \quad S = \sum \Delta h_i / \Delta l_i * 100$$

Donde: DV: Distancia vertical en metros  
 DH: Distancia horizontal en metros.  
 $\Delta h_i$ : Desnivel en metros.  
 $\Delta l_i$ : Distancia horizontal en metros.

En el Cuadro 4, se aprecian las cifras del perfil longitudinal de la quebrada San Francisco, perteneciente a la margen derecha del río Mocotíes

**Cuadro 4.** Perfil longitudinal de la quebrada San Francisco,

COTAS	PROGRESIVAS	$\Delta h_i$ (m)	$\Delta l_i$ (m)	S (%)
2351	0 + 000			
		51	67	76,12
2300	0 + 67			
		100	183	54,64
2200	0 + 250			
		100	253	39,53
2100	0 + 503			
		100	387	25,84
2000	0 + 890			
		100	394	25,38
1900	1 + 284			
		100	374	26,74
1800	1 + 659			
		100	260	38,46
1700	1 + 919			
		100	312	32,05
1600	2 + 230			
		100	498	20,08
1500	2 + 729			
		100	659	15,17
1400	3 + 388			
		100	956	10,46
1300	4 + 344			
		100	1071	9,34
1200	5 + 415			
		100	1803	5,55
1100	7 + 218			
		90	1562	5,76
1010	8 + 779			
	$\Sigma =$	1341	8779	15,28

Ejemplo aplicado: tomado de Delgadillo *et al.* (2004)

Al analizar algunas características morfométricas de la quebrada La Sucia, se tiene en primer lugar una pendiente media del cauce principal de 11,6% y una pendiente media de la cuenca de aproximadamente 31,7% resultados estos que pueden ser asociados con una quebrada torrencial y con un relieve escarpado. Los valores antes señalados favorecen la capacidad de arrastre de sedimentos e incrementan la velocidad del caudal en caso de tormentas. Llama la atención el valor elevado de Densidad de Drenaje igual a 2,0 Km/Km<sup>2</sup>, reflejo de una cuenca disectada y bien drenada que debería

generar una buena respuesta hidrogeomorfológica en el momento en que se presenten lluvias extremas. La relación de forma de Horton coincide en este caso, con un valor de 0,3 para una morfología ligeramente alargada de la cuenca que pudiera generar una menor rapidez en la concentración de aguas superficiales y por ende crecidas más graduales, si se considera este índice “por separado”. Otros aspectos vinculados con la red de drenaje pueden verse en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Algunas características de la red drenaje de la cuenca de la quebrada La Sucia

ORDENES DE LOS CAUCES (u)	NÚMERO DE ORDEN (Nu)	LONGITUD DE LOS CAUCES $\sum l_i, u$ (Km)	RELACIÓN DE BIFURCACIÓN (Rbu)	LONGITUD DE PROMEDIO DE LOS CAUCES DE ORDEN U. $\bar{l}_u$ (Km)	DENSIDAD DE DRENAJE Dd
1	111	71,00	4,11	0,64	2,0km/km <sup>2</sup>
2	27	34,50	5,40	1,26	
3	5	14,00	5,00	2,80	
4	1	12,50	–	12,50	
	$\sum = 144$	$\sum = 132$	Rb = 4,84		

En lo que respecta al río la González se obtuvo una pendiente media de la cuenca de 39,2 % (para un relieve escarpado) y una pendiente media del cauce principal de aproximadamente 10,6 % (asociada con un río torrencial) características estas que contribuyen, con la movilización y desplazamiento más rápido de los sedimentos y de los flujos de agua superficiales, aguas abajo de la cuenca. En relación con la red de drenaje (Cuadro 6) se estimó una relación de bifurcación promedio (Rb) de 4,74; con una longitud promedio de cauce de aprox. 0,24 km; 0,57 km; 1,66 km; 2,33 Km y 16 Km, para los ordenes 1,2,3,4 y 5 respectivamente. La Densidad de drenaje presenta un valor moderado a alto (1,9 km/km<sup>2</sup>) reflejo de una cuenca con suficiente drenaje como para producir buenos “picos de crecida”. Finalmente esta cuenca posee una forma alargada ocasionando retrasos en la concentración de la escorrentía desde los sitios más lejanos de la cuenca.

**Cuadro 6.** Algunos características de la red drenaje de la cuenca del río La González

ORDENES DE LOS CAUCES (u)	NUMERO DE ORDEN (Nu)	LONGITUD DE LOS CAUCES $\sum l_i, u$ (Km)	RELACIÓN DE BIFURCACIÓN (Rbu)	LONGITUD DE PROMEDIO DE LOS CAUCES DE ORDEN U. $l_u$ (Km)	DENSIDAD DE DRENAJE (Dd)
1	455	110,80	6,07	0,24	1,87km/km <sup>2</sup>
2	75	43,00	4,69	0,57	
3	16	26,50	3,20	1,66	
4	5	11,63	5,0	2,33	
5	1	16,00	–	16,00	
		$\sum = 207,93$	Rb = 4,74		



## REFERENCIAS CITADAS

- BELL, F. 1999. **Geological hazards. Their assessment, avoidance and mitigation.** E & FN SPON. An Imprint of Routledge. London and New York. 648 p.
- CHOW, V., MAIDMENT, D., y MAYS, L. 1994. **Hidrología aplicada.** Mc-Graw Hill. Santa Fé de Bogotá. 584 p.
- DELGADILLO, A., FERRER, C., y LAFFAILLE J. 2004. Caserío La González - urbanización Villa Libertad: un estudio de amenazas múltiples y vulnerabilidad en la cuenca media del río Chama (Andes Venezolanos). *Memorias del Quinto Congreso Venezolano Geografía.* 1 - 14. Mérida - Venezuela. (29 de noviembre - 3 de diciembre). (CD-ROM; Trabajo N° 17: Tema III Geomorfología. Amenazas Naturales y Riesgos Ambientales)
- DELGADILLO, A. y PAEZ, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. En: Ferrer, C. y Dugarte, M. (editores). Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del valle de Mocotíes. Mérida. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) - Fundación para la Prevención de los Riesgos del estado Mérida (FUNDAPRIS). *Inédito.*
- GUEVARA, E., y CARTAYA, H. 1991. **Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada.** Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela. 358 p.
- HORTON, R.E. 1932. *Drainage basin characteristics* **Trans. American Geophysical Union.** 13. 350 - 361.
- HORTON, R.E. 1945. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology* **Geological Society of America Bulletin** v. 56, p. 275 - 370.
- LINSLEY, R., KOHLER, M., y PAULHUS, J. 1977. **Hidrología para ingenieros.** Mc Graw - Hill. New York. 386 p.
- PÉREZ J. 1979. **Fundamentos del ciclo hidrológico.** Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas - Venezuela. 01 - 38.
- RUÍZ, J. 2001. **Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación.** UNELLEZ. Barinas - Venezuela. 298p
- SMITH, D. y STOPP, P. 1978. **The river basin. An Introduction to the study of hydrology.** Cambridge University Press. Londres - Inglaterra. 120 p.
- STRAHLER, A. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En: Chow, V (ed.). **Handbook of Applied Hydrology.** Mc Graw-Hill. New York - USA. Mc Graw-Hill