

MORFOMETRIA DE CUENCAS

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella; sin embargo, la poca información cartográfica de la que se dispone, hace que el encontrar esa relación no sea fácil y que por lo tanto su uso en estudios hidrológicos sea limitado, por otra parte no se puede garantizar que toda la información morfométrica de las cuencas utilizadas para el estudio se pueda obtener en una misma escala, lo cual aumenta el grado de incertidumbre sobre la confiabilidad de los parámetros (UNAL, 1997).

1. Parámetros asociados a la forma de la cuenca:

La forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de una determinada corriente, particularmente en los eventos de avenidas máximas, en particular, las cuencas de igual área pero de diferente forma, generan hidrogramas diferentes. Parece claro que existe una fuerte componente probabilística en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje. Por esta razón se han buscado relaciones de similitud geométrica entre las características medias de una cuenca y de su red de canales con esas de otras cuencas.

La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Para cuencas de igual superficie y formas diferentes se espera un comportamiento hidrológico también diferente. La medición de los factores de forma de una cuenca se realiza por medio de una metodología que permite cubrir dos objetivos. El primero, es que permite comparar la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas; el segundo, es que permite comparar los resultados de las mediciones, los cuales son adimensionales, con los obtenidos en otras cuencas en las que se puede tener mayor información histórica de su comportamiento hidrológico.

- **Área (A).**

Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; éste parámetro se expresa normalmente en km². Este valor es de suma importancia porque un error en su medición incide directamente en los resultados, por lo que se hace necesario realizar mediciones contrastadas para tener total confianza en este valor.

- **Perímetro (P)**

Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas. Éste parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en metros o kilómetros.

- **Longitud de la cuenca (L)**

Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (estación de aforo) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

- **Ancho de la cuenca (B):**

Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca

- **Orientación**

La orientación se determina de acuerdo a la orientación del río principal de la cuenca en relación al Norte y se considera su influencia especialmente en las zonas de ladera en donde la inclinación de las vertientes afectará la influencia solar. La orientación de la cuenca con respecto al movimiento del sol y a la interposición de las cadenas montañosas con respecto a las corrientes de aire, es un factor que influye en su comportamiento hidro-meteorológico.

- **Factor de Forma de Horton (K_f)**

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.

$$k_f = \frac{A}{L^2}$$

Intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.

Principalmente, los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región y la forma que tienen las cuencas hidrográficas. Un valor de K_f superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

- **Coefficiente de compacidad (kc)**

Propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Se define como la

razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parteaguas o divisoria que la encierra y el perímetro de la circunferencia. Este coeficiente adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Nunca los valores del coeficiente de compactidad serán inferiores a uno. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano a uno sea, es decir mayor concentración de agua.

$$k_c = \frac{P}{P_c} = \frac{P}{2\pi R}$$

Donde, P es el perímetro de la cuenca (longitud de la línea parteaguas), P_c es el perímetro de la circunferencia y R es el radio de la circunferencia. Se han establecido tres categorías para la clasificación de acuerdo con este parámetro:

Tabla 2. Características de la cuenca de acuerdo con el valor k_c

VALORES DE k _c	FORMA
1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga

La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dadas su simetría. Sin embargo, este índice de forma ha sido criticado pues las cuencas en general tienden a tener la forma de pera.

- **Relación de elongación (Re):**

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y cuyo diámetro sea igual la longitud de la cuenca y su formulación matemática es la siguiente:

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$$

El valor de la relación de elongación se acerca a la unidad cuando la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales, la relación de elongación está entre 0.5 y 0.8.

2. Parámetros relativos al relieve:

- **Altura y elevación**

Es uno de los parámetros más determinantes de la oferta hídrica y del movimiento del agua a lo largo de la cuenca. De ella dependen en gran medida la cobertura vegetal, la biota, el clima, el tipo y uso del suelo y otras características fisiográficas de un territorio. A continuación se describen los elementos más representativos de las cuencas, derivados de la elevación.

Cota mayor de la cuenca (CM): Es la mayor altura a la cual se encuentra la divisoria de la cuenca (msnm.).

Cota menor de la cuenca (Cm): Es la cota sobre la cual la cuenca entrega sus aguas a un cauce superior (msnm.).

Elevación promedia del relieve: Es la elevación promedia de la cuenca referida al nivel del mar.

Histograma de frecuencias altimétricas: Corresponde a la estimación del histograma de frecuencias de las elevaciones en la cuenca.

- **Pendiente**

Pendiente media de la cuenca (S): es el valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca.

Histograma de pendientes: permite conocer la distribución el porcentaje asociado a cada tipo de pendientes. (Tabla de clasificación de pendientes).

- **Curva Hipsométrica:**

Es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca, por medio de una curva tal, que a cada altura le corresponde un respectivo porcentaje del área ubicada por encima de esa altura.

3. Parámetros relativos al perfil

- **Cota mayor de cauce (CMc):**

Elevación del punto más alto del cauce (msnm.).

- **Cota menor de cauce (Cmc):**

Coincide con la cota menor de la cuenca (msnm.).

- **Pendiente promedio del cauce (S_0):**

Con base en el perfil altimétrico a lo largo del río se puede encontrar la pendiente de la recta ajustada a parejas de valores obtenidos en intervalos iguales a lo largo del cauce. Se aplica la técnica de los mínimos cuadrados.

- **Longitud del cauce principal(L_c):**

Corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio, en este parámetro se tienen en cuenta la sinuosidad cauce; éste parámetro se expresa normalmente en kilómetros.

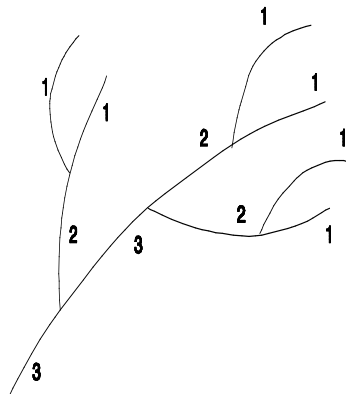
- **Longitud del cauce hasta la divisoria(L_f):**

Se estima prolongando longitud del cauce principal hasta la divisoria sumándole la distancia en línea recta que separa ambas medidas.

4. Parámetros relativos al drenaje

- **Orden de los cauces**

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Existen varios métodos para realizar tal clasificación. En este caso se optó por el método de Horton, el cual se fundamenta en los siguientes criterios: Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.



- **Longitud de los cauces de orden uno (L_1):**

Una vez establecidos los cauces de orden uno, se miden las longitudes de dichas corrientes.

- **Densidad de drenaje (Dd)**

Este índice relaciona la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca sobre la cual drenan las corrientes hídricas.

$$D_d = \frac{\text{Longitud corrientes (km)}}{\text{Area cuenca (km}^2\text{)}} \quad (1)$$

Con el fin de catalogar una cuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de densidad de drenaje próximo a 0.5 km/km² o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje.

- **Coefficiente de torrencialidad (Ct)**

Índice que mide el grado de torrencialidad de la cuenca, por medio de la relación del número de cauces de orden uno con respecto al área total de la misma. A mayor magnitud, mayor grado de torrencialidad presenta una cuenca.

$$C_t = \frac{\# \text{Cauces orden 1}}{\text{Area cuenca (km}^2\text{)}} \quad (2)$$

La descripción de las características morfométricas, fisiográficas, hidrológicas e hidráulicas entre otros, permite un mejor entendimiento del comportamiento del flujo de agua en la cuenca.

- **Relaciones de Bifurcación (Ct)**

Utilizando la jerarquización de Horton, Strahler (1969) propuso las razones de bifurcación

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

N_u corresponde al número de corrientes (o cauces) de orden u

5. Tiempo de concentración (Tc)

Es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca. Para la estimación del tiempo de concentración se recomienda emplear varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica, se considera apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes, (Ven Te Chow, 1994).

Ramser y Kirpich lo definen como el tiempo al pico T_p , Viessman (1977) lo define como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa. Siendo este último valor, el punto de inflexión del hidrograma después del caudal pico. Témez (1978) lo define como la diferencia entre el tiempo de finalización del hidrograma de escorrentía superficial directa y el tiempo de finalización de la precipitación efectiva.

En la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración T_c de las cuencas hidrográficas, desarrolladas por diferentes autores para diferentes regiones del mundo. A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones utilizadas en el presente estudio y tomadas de diferentes fuentes (Chow et al., 1994; Hidrología de Antioquia, 1997; Linsley et al., 2002, Viessman y Lewis, 2003, Vélez y Botero, 2011):

- **Scs-Ranser**

$$T_c = 0.97K^{0.385} \text{ Siendo } K = \frac{L_c^3}{H}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

H es la diferencia entre la cota mayor y la cota menor de la cuenca (pies).

L_c es la longitud del cauce principal (km)

- **California Culvert Practice (1942):**

$$T_c = \left(0.87 \frac{L_c^3}{H} \right)^{0.385}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

H es la diferencia entre la cota mayor y la cota menos de la cuenca (m).

L_c es la longitud del cauce principal (km)

- **Kirpich (1942):**

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0.77}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_f es la longitud del cauce principal hasta la divisoria (kilómetros).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (m/m)

- **Témez (1978):**

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L_c}{S_0^{0.25}} \right)^{0.76}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_c es la longitud del cauce principal (km).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (en porcentaje).

- **Giandotti:**

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_c}{25.3\sqrt{L_c S_0}}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_c es la longitud del cauce principal (km).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (m/m),

A es el área de la cuenca (km²).

- **V.T Chow.**

$$T_c = 0.8773 \left(\frac{L_c^{1.5}}{\sqrt{CM_c - Cm_c}} \right)^{0.64}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_c es la longitud del cauce principal (km).

CM_c es la cota mayor del cauce principal (m.s.n.m).

Cm_c es la cota menor del cauce principal (m.s.n.m).

- **Clark:**

$$T_c = 0.335 \left(\frac{A}{S_0^{0.5}} \right)^{0.593}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (m/m).

A es el área de la cuenca (km^2).

- **Ventura-Heron (1949):**

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L_c}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_c es la longitud del cauce principal (kilómetros).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (en porcentaje).

- **Passini:**

$$T_c = 0.108 \frac{(AL_c)^{1/3}}{\sqrt{S_0}}$$

T_c es el tiempo de concentración (horas).

L_c es la longitud del cauce principal (km).

S_0 es la pendiente promedio del cauce principal (m/m).

A es el área de la cuenca (km^2).

