

## MEDICION DE CORRIENTES DE AGUA CON FINES DE INGENIERIA DE REGADIOS

*Lucio Legarda Burbano<sup>1</sup>*  
*Hugo Ruiz Erazo<sup>2</sup>*

### RESUMEN

Los métodos para medir el caudal de una corriente, sea quebrada o río más empleados y de fácil ejecución son el método volumétrico, tubo venturi, colorantes, ecuación del gasto de Bernoulli, método de la caída libre, para tuberías.

Y para conductos abiertos los más utilizados son las estructuras hidráulicas como orificios, vertederos y el aforador Parshall.

Por otra parte teniendo en cuenta la velocidad y área de la sección transversal de un caudal o río se emplean los métodos del molinete, los flotadores, lemnímetros, y el método de Manning.

El método a emplear depende del grado de dificultad de la corriente, de la justificación económica, de la exactitud de la medición y del objetivo del estudio, ya sea en diseño de acueducto, proyecto de riegos y drenajes, etc.

<sup>1</sup> Profesor Titular. Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas. Pasto, Nariño, Colombia.

<sup>2</sup> Profesor Hora Cátedra, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño. Pasto, Nariño, Colombia

## INTRODUCCION

El agua en Colombia es cada día más escasa y costosa, por lo tanto se requiere que sea usada económicamente y sin desperdicios. Esto no puede llevarse a cabo sin una medición de agua satisfactoria. Desde el punto de vista de la ingeniería de regadíos, la medición de corrientes de agua es muy importante, para la correcta proyección y operación económica de los sistemas de riegos.

Así mismo es importante la cuantificación del caudal que transporta un canal, una acequia, un río, una quebrada, para su utilización en la industria, en la agroforestería, en los diseños de acueductos y es útil para definir las políticas de manejo y mejor aprovechamiento de este valioso recurso natural.

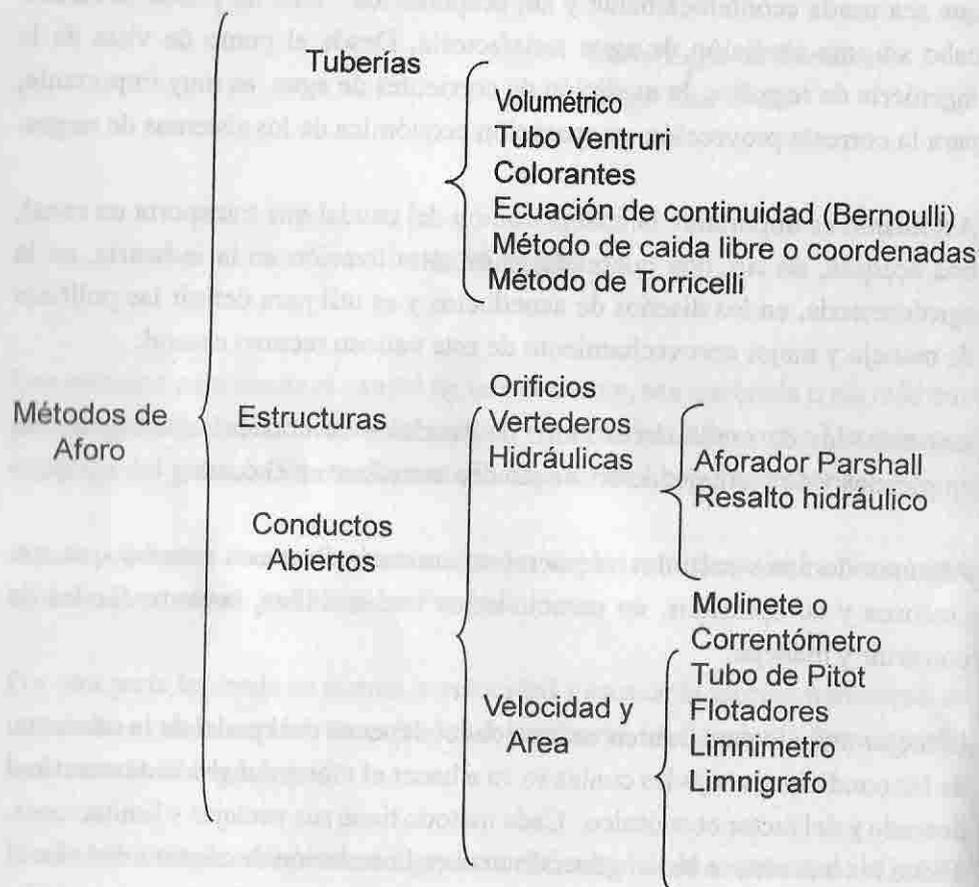
Los métodos de medición o aforo de caudales de corrientes de agua más empleados y de fácil ejecución, se pueden sintetizar en el cuadro 1.

Algunos de estos métodos requieren aparatos hechos con esmero que son costosos y complicados, en cambio otros son sencillos, baratos, fáciles de construir y manejar.

El mejor método para usar en un caso dado, depende del caudal de la corriente, de las condiciones bajo las cuales se va a hacer el aforo, del grado de exactitud deseado y del factor económico. Cada método tiene sus ventajas y limitaciones. Todos los métodos se basan generalmente en la ecuación de continuidad. En el presente trabajo se destaca la importancia de cada uno de los métodos arriba mencionados, resaltando sus falencias y fortalezas.

Método volumétrico. El método consiste en hacer pasar una corriente a un recipiente o tanque que sea capaz de contenerlo en un tiempo reducido; el caudal aforado será la relación entre el volumen captado y el tiempo empleado en la captación.

### Cuadro 1. Métodos de medición o aforo de caudales de agua



El método volumétrico es excelente en trabajos experimentales de laboratorio, también para corrientes pequeñas especialmente en zonas de ladera, en donde los caudales son de poca magnitud y el relieve ayuda para producir la descarga

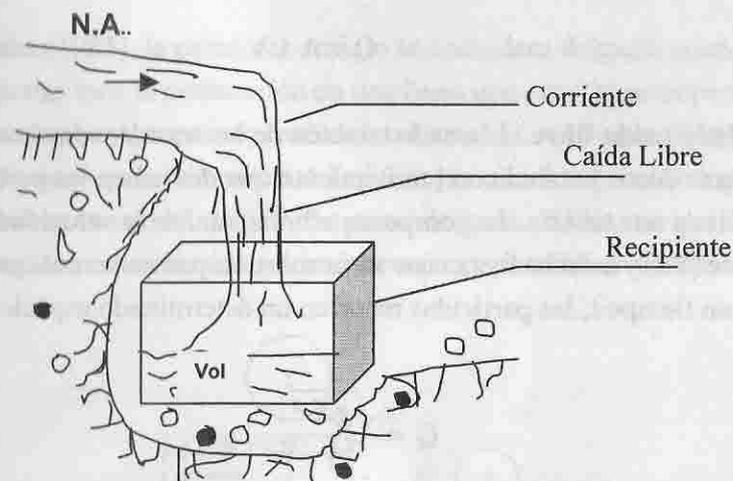


Figura 1. Método volumétrico de una corriente de agua.

**Método del tubo de Venturi.** Un medidor o aforador de Venturi es un estrechamiento o garganta en un tubo, que se utiliza para determinar caudales, basándose en la ecuación de Bernoulli, la cual se explica más adelante.

**Método de los colorantes.** Para medir la velocidad del agua en un conducto se utilizan también colorantes que se inyectan en la corriente aguas arriba y son detectados aguas abajo en un tramo de 10 a 20 metros. Los colorantes son preferibles, ya que su presencia se puede detectar visualmente; siendo los más empleados la fluorescencia y el permanganato de potasio, azul de metileno, violeta de genciana, entre otros.

**Ecuación de continuidad de Bernoulli.** Los aportes valiosos de este físico suizo para determinar el caudal de una corriente cerrada o abierta se basan en el área de conducción, en la velocidad del agua, en el perímetro mojado, en la naturaleza del material de construcción del ducto, en la pendiente, en la presión y en la altura de caída del agua. La magnitud del caudal ( $Q$ ) depende de dos factores: el área ( $A$ ) de la sección transversal de la corriente y la velocidad ( $V$ ) promedia del agua. Por la ecuación de continuidad se tiene que:

$$Q = A \times V$$

**Método de la caída libre.** Llamado también de las coordenadas que consiste en considerar como parabólico el movimiento que describen las partículas de agua al salir de una tubería. La componente horizontal de la velocidad del flujo es constante ( $V_x$ ) y la única fuerza que actúa sobre las partículas es la gravitación ( $g$ ). Para un tiempo  $t$ , las partículas recorren un determinado espacio.

$$Q = \frac{\sqrt{gX^2}}{2Y}$$

$Q$  = Caudal de la tubería

$X$  = Distancia horizontal

$Y$  = Distancia vertical

$g$  = Aceleración de la gravedad

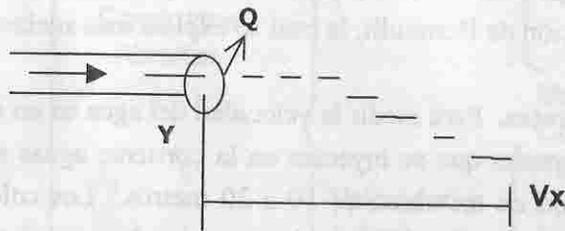


Figura 2. Método de las coordenadas.

**Método de los orificios.** Los orificios son perforaciones de forma geométrica definida, localizados debajo de la superficie libre del agua, en las paredes de los servicios, tanques, canales o canaletas. Las aberturas hechas en la superficie del agua constituyen los vertederos (Israelsen y Hansen, 1985).

El objeto principal de esta estructura es aforar el agua, aunque en numerosas situaciones también se los emplea para regular y distribuir el agua hacia los terrenos de riego o de empleo humano o animal.

Para Trueba (1985), la pared del orificio se considera delgada, cuando la vena líquida apenas toca la perforación en una línea que constituye el perímetro del orificio; en la pared gruesa se presenta la adherencia de la vena. Si el espesor es mayor 1,5 veces que el diámetro del orificio, la pared se considera gruesa, por el contrario se considera orificio de pared delgada. El chorro que sale por el orificio se llama vena líquida y su trayectoria es parabólica (Addison, 1980).

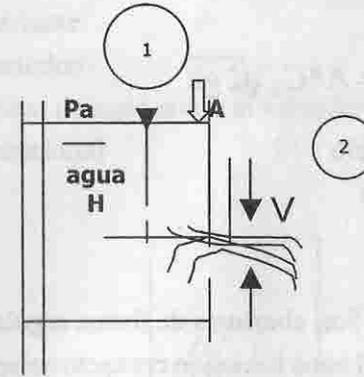


Figura 3. Orificios en pared delgada.

De acuerdo con Linsley y Franzini (1984), en el caso de orificio circular, la sección contraída se encuentra a una distancia de la cara interna del orificio, aproximadamente la mitad del diámetro de aquel.

Según la Figura 3, si se aplica el teorema de Bernoulli a las secciones 1 y 2, se toma el eje del orificio como plano de referencia, se tiene que la carga de velocidad ( $V$ ) o dinámica, la carga de presión ( $P$ ) o tensión y la carga geométrica o posición  $h$  son iguales.

Como lo más común es que la vena líquida escurra en la atmósfera, entonces:

$$V = \sqrt{2gh}$$

Esta es la expresión del teorema de Torricelli: Que dice que “cada partícula al atravesar un orificio, esta animada de la misma velocidad que un cuerpo con caída libre, desde la superficie del líquido hasta el eje del orificio”.

Designando como coeficiente de descarga ( $C_d$ ) al producto del coeficiente de contracción del orificio por el coeficiente de reducción de la velocidad, la fórmula general para orificios en pared delgada y pequeños es:

$$Q = A * C_d \sqrt{2gh}$$

Q = Caudal del orificio

A = Area del orificio

h = Altura

**Método de los vertederos.** Son aberturas de forma regular hechos a través de un muro, por donde circula el agua haciendo contacto solamente con los bordes inferior y lateral de dicha abertura, es decir contacto parcial, según De Azevedo y Alvarez (1976).

Los tipos más comunes de vertederos son los que tienen dos, una o ninguna contracción. Desde el año de 1850, Francis citado por Trueba (1985), trabajó con los vertederos y dedujo una fórmula de corrección para la longitud de la cresta o solera:

$$L' = L - 0,1 n \times H$$

$L'$  = longitud real de la cresta (ancho o distancia horizontal)

$L$  = longitud estructural de la cresta

$n$  = número de contracciones:

$H$  = carga del vertedero

**El vertedero rectangular** es sobre el cual se han realizado más ensayos para establecer una fórmula del gasto. Sin embargo, aquí solo se presenta la fórmula presentada por Francis citada por Israelsen y Hansen (1985), la cual da resultados aceptables con precisión del 98%, siempre y cuando  $L \geq 3H$ ;

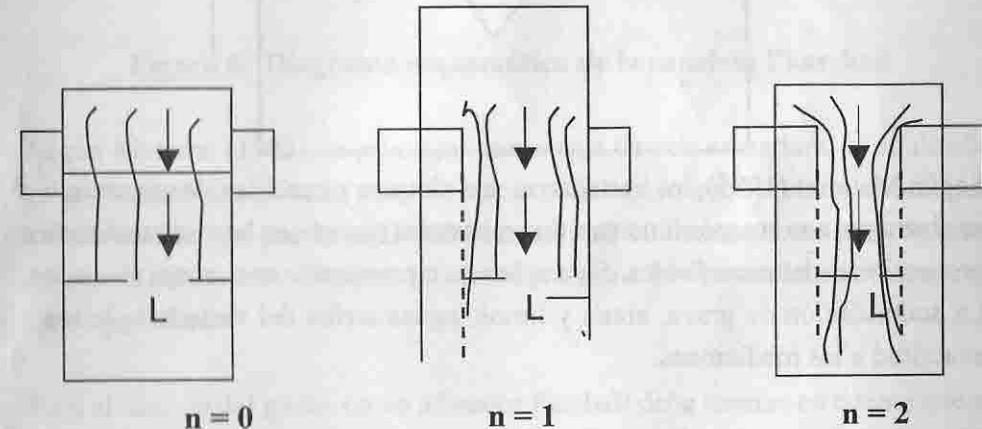
$$Q = K L' \times H^{3/2}$$

Q = Caudal de la corriente

$L'$  = Longitud del vertedero

H = Altura de la lámina de agua sobre el vertedero

K = Constante adimensional



#### Figura 4. Vertederos sin contracciones y con contracciones

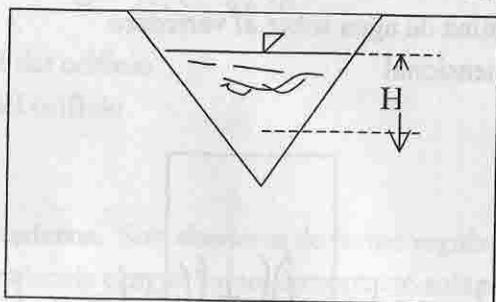
El **vertedero triangular** es muy apropiado para medir el gasto, cuando este es pequeño. La forma más usada es el triángulo isósceles, para el cual la fórmula del gastos es:

$$Q = K H^{5/2} a$$

H = altura de la descarga

a = Angulo del triángulo isósceles

K = Constante adimensional



Según Materon (1985), los vertederos, son simples y sencillos de construir, no se obstruyen con cuerpos flotantes, duran bastante tiempo; en buenas condiciones proporcionan datos confiables. Su empleo es impracticable en terrenos nivelados. La acumulación de grava, arena y limos, aguas arriba del vertedero, le resta exactitud a las mediciones.

**Método de la canaleta Parshall.** De acuerdo con Materon (1985) el medidor Parshall está formado por tres secciones: una sección convergente de aguas arriba; una sección de garganta; y una sección divergente aguas abajo. El piso de la sección convergente está nivelado, tanto longitudinal como transversalmente; el de la garganta se inclina hacia abajo, y el de la sección divergente tiene un declive ascendente.

El gasto en el aforador Parshall ocurre bajo dos diferentes condiciones de flujo: una donde no existe sumergencia, es decir flujo libre, y otra de flujo sumergido. Para calcular el caudal, se dispone de dos medidores colocados a diferente profundidad.

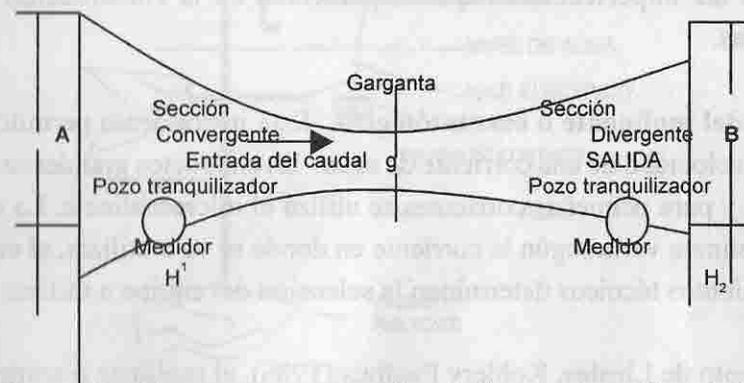


Figura 6. Diagrama esquemático de la canaleta Parshall

Según Materon (1985), la principal desventaja de esta estructura, es su diseño relativamente complicado y su tolerancia crítica en lo que se refiere a construcción e instalación por lo cual debe controlarse cuidadosamente para obtener aforos satisfactorios. El error del aforador Parshall es generalmente inferior al cinco por ciento.

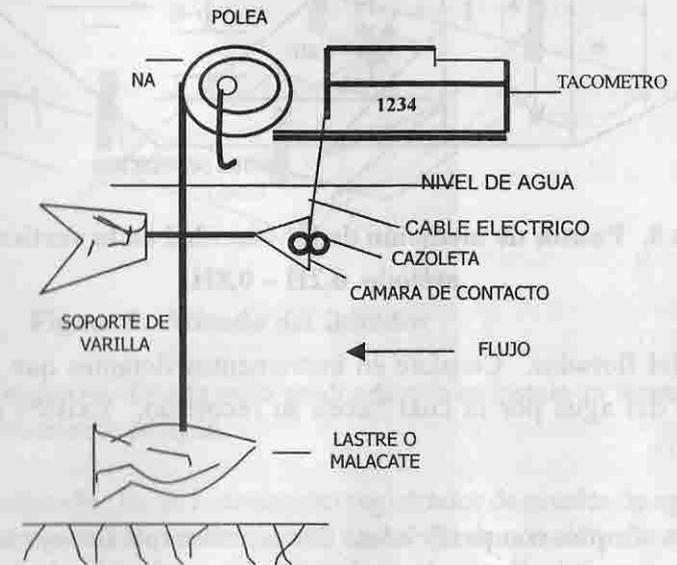
Para el cálculo del gasto en un aforador Parshall debe tenerse en cuenta que si  $H_2 < H_1$  el aforador trabaja a descarga libre, el caudal es función únicamente de la profundidad de entrada. Cuando  $H_2 = H_1$  el medidor trabaja con sumersión, y el gasto es función de la profundidad del agua. El grado de sumersión (S) relaciona la profundidad de flujo aguas arriba ( $H_2$ ) y la profundidad de flujo aguas abajo ( $H_1$ ). Los valores de sumergencia S permiten deducir si el aforador trabaja con flujo libre o flujo sumergido. El caudal (Q) se calcula por medio de fórmulas, teniendo en cuenta el ancho de la garganta y la cabeza o altura del agua en el pozo de medición. Además para los diferentes anchos de garganta y condiciones de flujo se han elaborado tablas y nomogramas.

Este tipo de estructuras tiene la ventaja que no se afecta por sedimentos y la velocidad de llegada del agua, aumentando el costo de construcción con relación a los vertederos anteriores. En estas estructuras es conveniente chequear los coeficientes asumidos, efectuando una serie de aforos con molinete; esto es debido a las imperfecciones que se presentan en la construcción de estas estructuras.

**Método del molinete o correntómetro.** Este instrumento permite medir o aforar la velocidad de una corriente de agua. En conductos grandes se utiliza el molinete y para pequeñas corrientes se utiliza el micromolinete. La selección de un molinete varía según la corriente en donde se va a utilizar, el costo y los requerimientos técnicos determinan la selección del equipo a utilizar.

En concepto de Linsley, Kohlery Paulhus (1986), el molinete o correntómetro es un elemento mecánico que gira sobre un eje vertical u horizontal con una velocidad angular que depende de la velocidad lineal del agua en ese punto de medición. El elemento giratorio puede ser una hélice o un sistema de cazoletas. Cuando se utiliza una hélice esta gira sobre un eje de tipo horizontal y si se utiliza el sistema de cazoletas el giro se realiza sobre un eje vertical. La experiencia ha demostrado que el sistema hélice presenta mayor precisión y versatilidad para las diferentes condiciones de flujo. La presencia de sedimentos en el agua afecta en menor grado el sistema hélice en comparación con el sistema de cazoletas.

De acuerdo con Materon y Jiménez (1985), el molinete consta fundamentalmente de las partes siguientes como se muestra en la Figura 7; cuerpo del molinete o cuerpo central el cual está graduado longitudinalmente en centímetros. Hélice o rotor. Conectado a un cuerpo fuselado, que se sujeta a la barra del cuerpo del molinete, malacate para no ser arrastrado por la corriente. Empuñadura para manipular el aparato. Alambres eléctricos para leer las lecturas del tacómetro. Cámara de contactos de la hélice y cronómetro para determinar el tiempo en que ocurren las revoluciones del molinete.

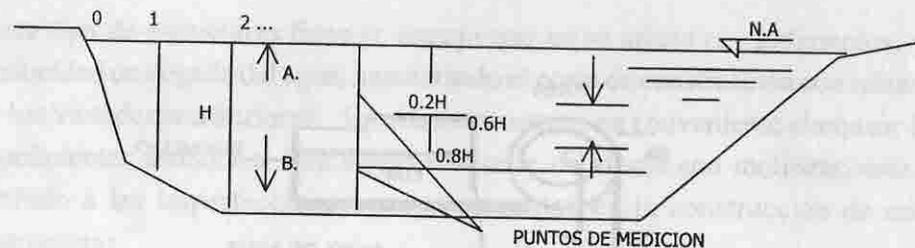


**Figura 7. Partes de un molinete o correntómetro de eje vertical**

En concepto de Vente Chow (1980), la velocidad promedio del agua en cada vertical, se calcula midiéndola en varios puntos de ella con el molinete. De acuerdo con los puntos que se tomen en cuenta, se denominará para la estimación de la velocidad.

El aforo puede ser por vadeo cuando la corriente es poco profunda y poco caudalosa que permite vadearla, a pie y por suspensión cuando se hace en ríos caudalosos y profundos por medio de puentes, tarabitas, cables, etc.

En el método por vadeo considerando la poca profundidad del agua se emplean principalmente dos formas a saber: Método  $0,2H - 0,8H$  (dos décimas - ocho décimas de la altura) y el promedio a 6 décimas de altura.

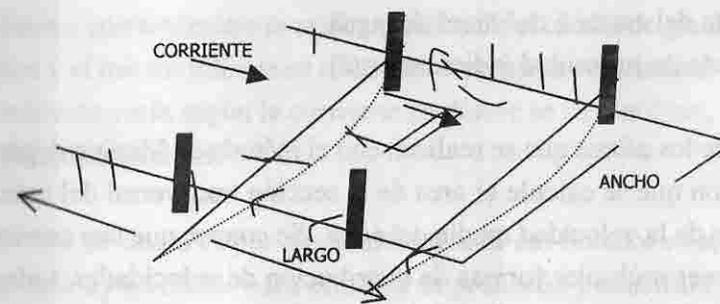


**Figura 8. Puntos de medición de la velocidad en la vertical i por el método 0,2H – 0,8H.**

**Método del flotador.** Consiste en instrumentos flotantes que adquieren la velocidad del agua por la cual hacen su recorrido. Existen dos tipos de flotadores:

**Flotadores simples o superficiales.** Son aquellos que flotan en la superficie del agua y miden la velocidad superficial de la corriente. Se toma el 80% de la velocidad superficial. El inconveniente presentado por este flotador, es el debido al hecho de estar influenciado por el viento, por las corrientes y por las olas. El procedimiento consiste en lo siguiente: Se toma un tramo de 5 a 10 mts de longitud de la corriente, en la cual se determinan las áreas en 4 puntos, por ejemplo si es de 10 mts, a 0 mts, a 3,5 mts; a 7,0 y a 10 metros y se obtiene un promedio. Con el flotador (pelota de ping – pong) se determina el tiempo que tarda en recorrer los 10 mts y se calcula la velocidad al 80%, así  $V = S$  (espacio) sobre  $T$  (tiempo) y se calcula Caudal. Caudal = Área por Velocidad (Legarda, 1984).

**Flotador de inmersión o subsuperficial.** Están constituidos por una especie de cesto lastrado (piedra u otra cosa pesada) unido a un pequeño flotador (pelota ping – pong, o corcho, etc) mediante una cuerda cuya longitud se regula de modo que el cesto se halle a 0,40 mts de la profundidad a contar desde la superficie libre del agua, y luego se calcula el caudal en base al área y velocidad promedia. (Buritica, 1994).



**Figura 9. Método del flotador**

**Método Limnimetro.** Es una mira graduada que se instala en forma vertical y rígida en una corriente de agua.

**Método Limnigrafo.** Es un instrumento registrador de niveles de agua. Con él se hace un hidrograma de escurrimiento en un eje de coordenadas cartesianas, así en el eje de las Y el caudal y en el eje de las X el tiempo (Caudal vs Tiempo). El limnigrafo consta de un tambor o flotador, una plumilla que actúa sobre una gráfica, posee un contrapeso. Es accionado por un sistema de relojería (Hena, 1988).

**Método de Maning.** El método área y pendiente de Maning es utilizado para determinar el caudal que circula por un cauce después de ocurrida una avenida. La descarga se calcula en base a la ecuación de flujo uniforme, por lo tanto se hace necesario encontrar las características geométricas del cauce, los niveles alcanzados por el agua, y el coeficiente de rugosidad (King, 1985).

En condiciones de flujo uniforme se calcula el caudal por medio de la ecuación de Maning.

$$Q = \frac{A R^{2/3} \times S^{1/2}}{n}$$

$Q$  = caudal

$A$  = área de la sección transversal

$R$  = radio hidráulico

$S$  = pendiente del cauce ó del nivel del agua

$n$  = coeficiente de rugosidad (adimensional)

La precisión de los aforos que se realicen con el método de Maning depende de la exactitud con que se calcule el área de la sección transversal del cauce y la determinación de la velocidad media del agua. Se conoce que una corriente de agua puede tener múltiples formas de distribución de velocidades, todas ellas de acuerdo con dimensiones y forma de sección transversal.

Según Trueba (1974) y Remenieras (1987), la fórmula de Maning se ha mostrado como la más precisa y sencilla. Presentan valores de  $n$  simples y exactos, y valores de velocidad aceptables. Por estas razones y por la gran simplicidad que ofrece, la fórmula de Maning ha ganado gran popularidad para el diseño de canales. Además presenta un monograma sencillo para calcular la velocidad.

Debe tenerse cuidado en su selección del coeficiente de rugosidad  $n$ , ya que un valor alto daría una velocidad baja y un área mayor. Un valor bajo daría un área menor que la necesaria, es decir es inconveniente proporcional (Legarda, 1988).

### CONCLUSIONES

En zonas de ladera, que conducen pequeños caudales de agua, el método volumétrico es el más adecuado para aforar una corriente.

El método a usar para determinar el caudal de una corriente depende del grado de dificultad de la corriente, de la justificación económica, de la exactitud de la medición y del objeto del estudio ya sea en diseño de riego de acueducto, de drenajes, etc.

El vertedero rectangular sin contracciones es el que más datos confiables presenta en comparación al vertedero triangular o circular.

El molinete o correntómetro se utiliza para medir el caudal de grandes corrientes como ríos y el micromolinete se utiliza para pequeñas corrientes. La selección de un molinete varía según la corriente en donde se va a utilizar, el costo y los requerimientos técnicos.

La medición de caudales por medio del método del flotador es aproximada, es decir no es muy confiable para estudios de precisión y exactitud.

La fórmula de Manning para el diseño de caudal rectangular se ha mostrado como la más precisa y sencilla. Presenta valores del coeficiente de rugosidad simples y exactos y valores de velocidad aceptables.

### BIBLIOGRAFIA

ADDISON, H. Manual de hidráulica. Barcelona : Ed. Gustavo Gill, 1980. 680 p.

BURITICA, A. Caudales de riego. In: Curso de pequeña irrigación. Pasto. 25 p.

DE AZEVEDO, J. N. y ALVAREZ, A. Manual de Hidráulica. Brasil : 6ª. Ed. Universidad de Sao Paulo, 1976. 576 p.

DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS. Servicio de Conservación de Suelos. Medición del agua de riego. Trad. Emilio Avila. México. Colección de Ingeniería No. 5. 1972. 86p.

HENAO S, J. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá : Universidad San Tomás, 1988. 105 – 107 p.

INSTITUTO NACIONAL DE ADECUACION DE TIERRAS. INAT. 1994. 25p.