

# EVALUACIÓN DE RECURSOS HIDROENERGÉTICOS



*Mg. Amancio Rojas Flores*

## 2.2. Medición del caudal

En razón de que el caudal de los ríos varía a lo largo del año, realizar una medida del caudal instantáneo resulta un registro aislado cuya utilidad es relativamente pequeña.

Es probable que muchas veces no exista la información necesaria para hacer un estudio de hidrología, entonces nos veremos forzados a recolectar nuestros propios datos a partir de mediciones instantáneas del caudal; sin embargo, de ser posible y si el proyecto lo amerita, habrá que buscar especialistas en el tema, de tal forma que se pueda obtener una estimación del caudal lo más certera posible.

La similitud de cuencas hidrográficas es muy utilizada para estimar un caudal donde no existe información hidrográfica.

Lo ideal es hacer mediciones a diario, aunque también se usan mediciones semanales y mensuales.

Es importante que estas mediciones se realicen en temporada de sequía (ausencia de lluvias), ya que es el tiempo más crítico e ideal para el diseño de un proyecto.

Los métodos de medición de caudal más utilizados son:

- Método de la solución de la sal
- Método del recipiente
- Método del área y velocidad
- Método de la sección y control de la regla graduada
- Método del vertedero de pared delgada

Es necesario estudiar las características de estos métodos a fin de utilizarlos adecuadamente, aprovechando las ventajas que ofrecen en cada caso particular.

## 2.2.1. Método de la solución de sal

Este método es fácil de usar y bastante preciso. Las mediciones bien efectuadas darán errores menores a 5 % y permiten hacer estimaciones de potencia y cálculos posteriores.

Este método se basa en el cambio de la conductividad del agua ( $\text{ohm}^{-1} = 1$  siemens), al cambiar el grado de concentración de sal. De este modo, si disolvemos una masa (M) de sal en un balde y vertemos la mezcla en una corriente de agua, dándole el tiempo necesario para diluirse, provocaremos un incremento de la conductividad que puede ser medido, como se explica más adelante, mediante un equipo llamado conductivímetro.

Como podemos imaginar, dicho incremento de la conductividad dura un cierto tiempo y no es uniforme durante ese lapso. Es decir, habrá pequeños incrementos al inicio y al final del paso de la nube (o concentración) de sal, mientras que habrá un máximo en una situación intermedia.

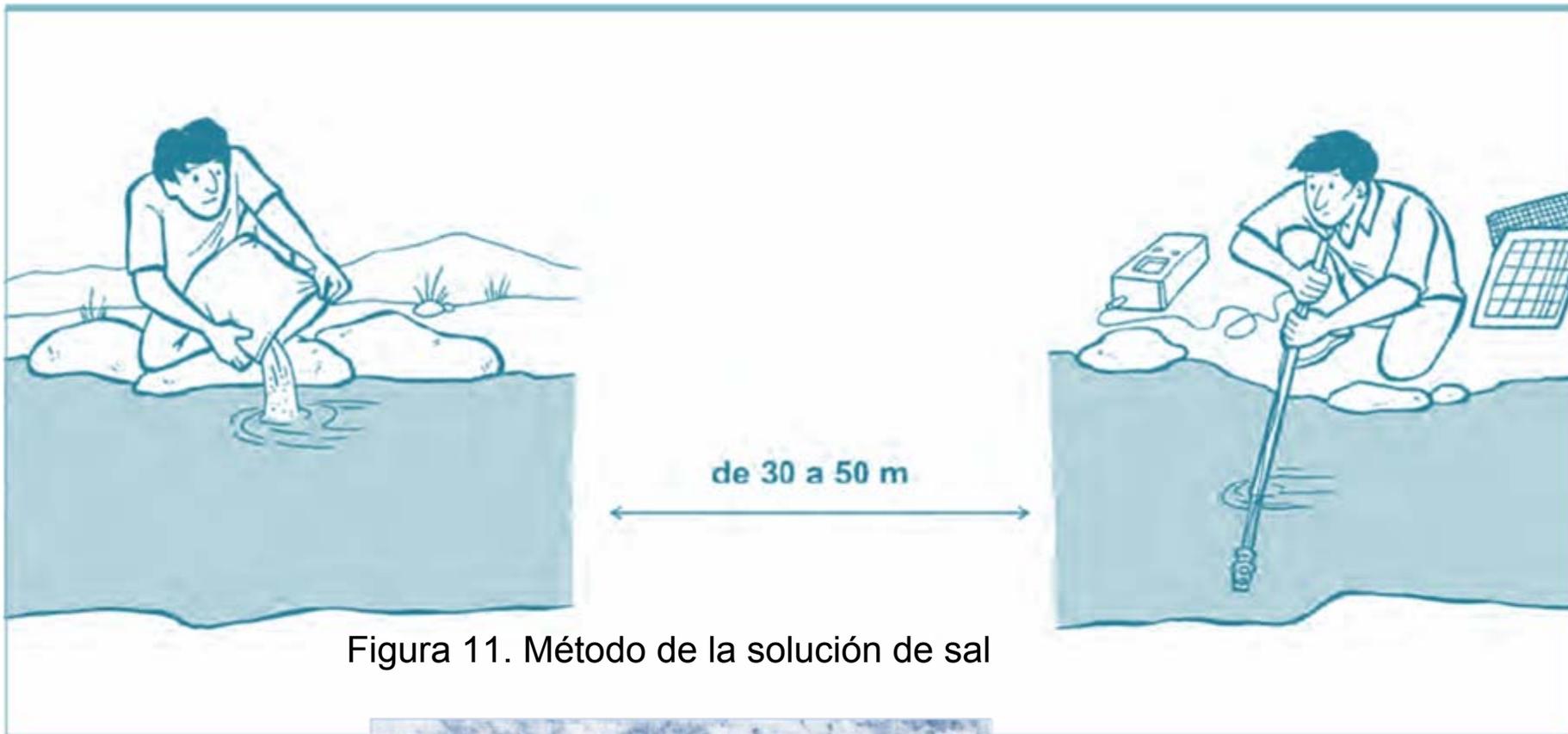


Figura 11. Método de la solución de sal



Figura 12. Medidor de la conductividad con sensores

Si hacemos mediciones de conductividad en siemens (S) o microsiemens ( $\mu\text{S}$ ) en intervalos de tiempo cortos (como 5 segundos), desde que se inicia el paso de la nube de sal hasta el paso total de la misma y luego se grafica conductividad ( $\mu\text{S}$ ) versus tiempo (t), se encontrará una curva de distribución más o menos uniforme.

Matemáticamente es demostrable que el caudal del río o quebrada en cuestión se puede calcular con la siguiente expresión, que relaciona el caudal con la masa de sal y el área bajo la curva obtenida y corregida por un factor k.

$$Q = k(M/A)$$

Donde:

Q = caudal (litros/s)

M = masa de sal (miligramos)

k = factor de conversión [ $\mu\text{S}/(\text{mg}/\text{litro})$ ]

Tal como se aprecia en la figura 13, el factor k varía con la temperatura, por consiguiente, es importante conocer la temperatura del agua en el momento de la medición, a fin de calcular el factor adecuado.

## a. Equipo necesario

- Conductivímetro
- Cronómetro
- Balanza con precisión en gramos
- Sal de mesa
- Balde de 10 litros
- Termómetro
- Calculadora científica
- Papel milimetrado
- Bolsas de plástico
- Pico, lampa, machete

## b. Procedimiento

- Estimar el caudal de la fuente a medir
- Pesar una cantidad de sal de mesa (seca) en gramos, haciendo uso de las bolsas, teniendo como referencia la relación de 1 gramo de sal por cada 1 litro/s de agua
- Medir la temperatura del agua y registrarla en el conductivímetro

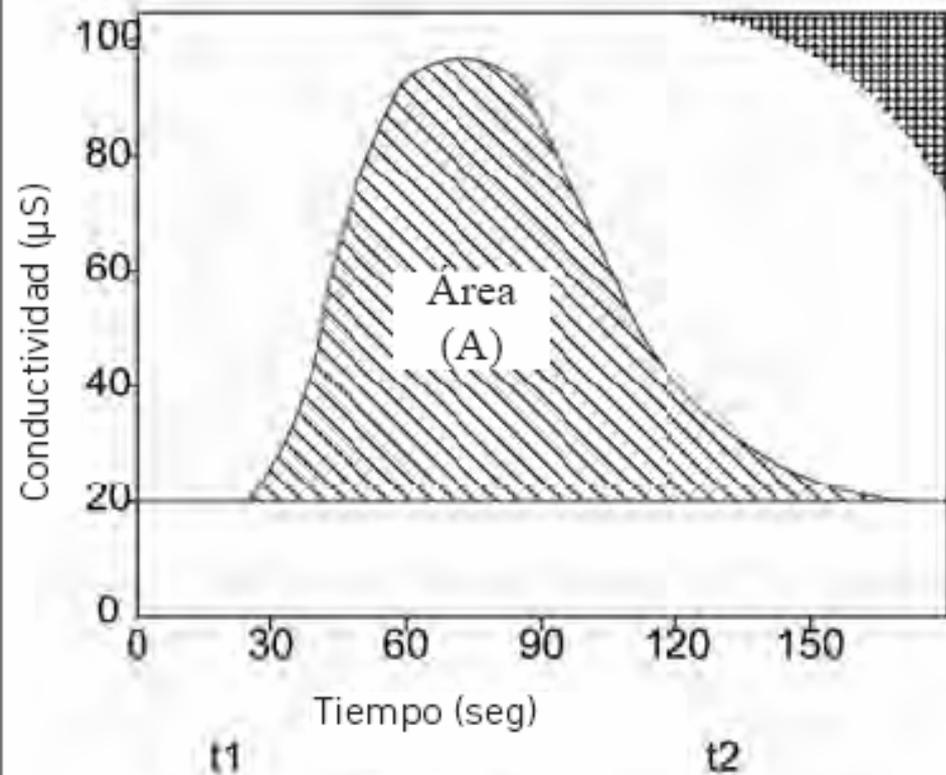
- Seleccionar un tramo del río o quebrada (no menos de 30 m) observando que la velocidad superficial sea uniforme, libre de obstáculos (piedras, ramas, remansos, remolinos, etc.); estas consideraciones son importantes, ya que ello influirá en los resultados de la medición
- Disolver la bolsita de sal pesada en un balde de 10 litros de capacidad, llenarlo con agua hasta llegar a  $\frac{3}{4}$  de su volumen para evitar el derrame de la solución al momento de la disolución
- Determinar en el tramo seleccionado el lugar de aplicación de la solución de la sal, así como el extremo donde se colocará el sensor del conductivímetro para tomar las medidas
- Introducir el sensor del conductivímetro dentro del agua para medir la conductividad base del agua. Tener listo el cronómetro y preparar el registro para tomar los datos
- Ordenar a la persona que está ayudando a verter la solución de sal en el punto indicado, registrar los valores de la conductividad cada 5 segundos

- Procesar los datos en una hoja milimetrada y graficar la conductividad versus tiempo
- Calcular el área encerrada por la curva y trazar una línea recta que una la conductividad base (primer punto leído) con el último punto (ver figura 13a)
- Determinar el factor de corrección por temperatura  $k$  en  $\mu\text{S}/\text{mg}/\text{litro}$ , haciendo uso de la figura 14b
- Calcular el caudal, utilizando la fórmula:  $Q = k(M/A)$

### c. Recomendaciones

- Si el medidor de conductividad se satura, cambiar la escala
- Si el paso de la nube de sal es muy rápido, usar una distancia mayor
- La solución debe ser lo suficientemente agitada como para obtener una buena dilución antes de verter al río
- El gráfico resultante debe tener una forma más o menos regular (ver figura 14e)
- Tener cuidado con la unidades en el momento de hacer los cálculos

a. Gráfico de lectura de conductividad



b. Factor de conversión en función de la temperatura

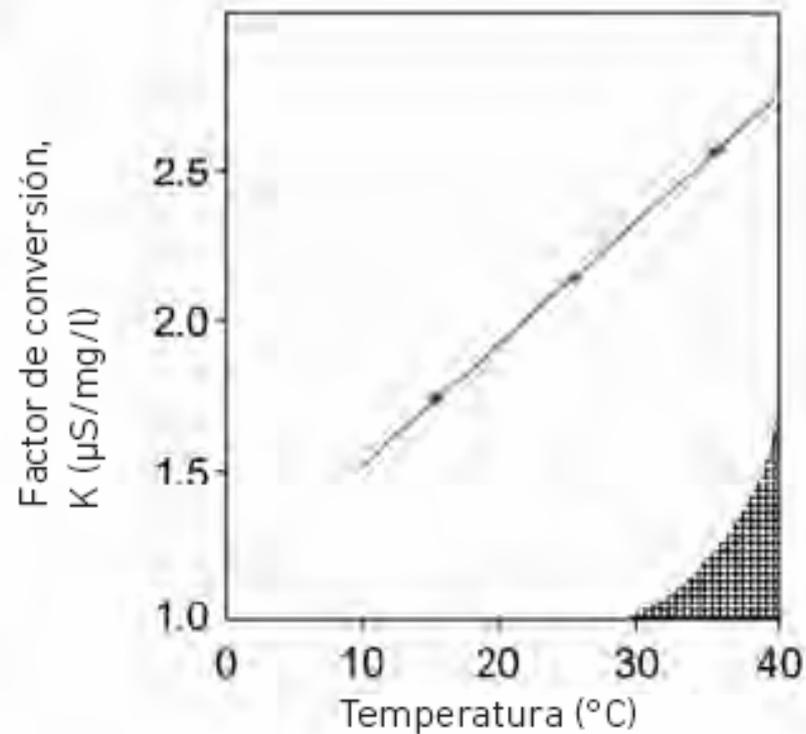
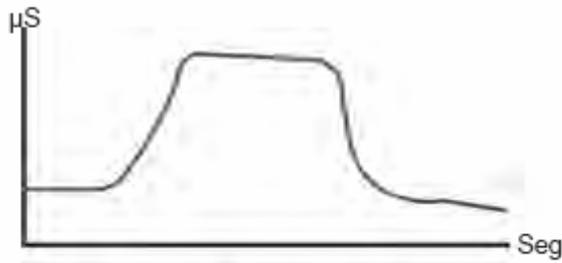


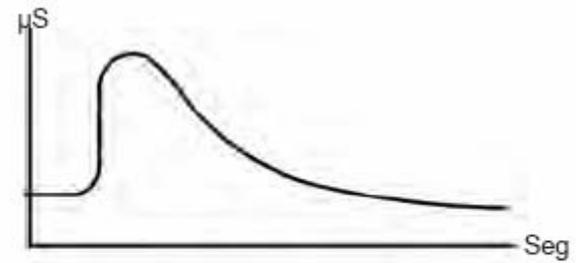
Figura 13. Área bajo la curva y factor de corrección

Donde:

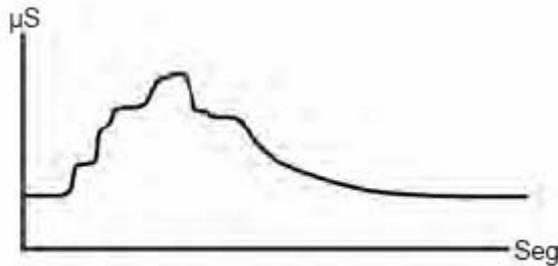
$A$  = área bajo la curva en  $\mu\text{S}$  por segundo



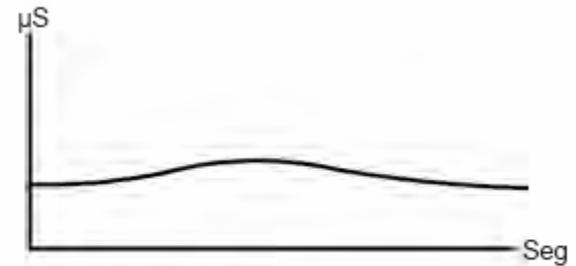
a) Cambiar escala o usar menos sal



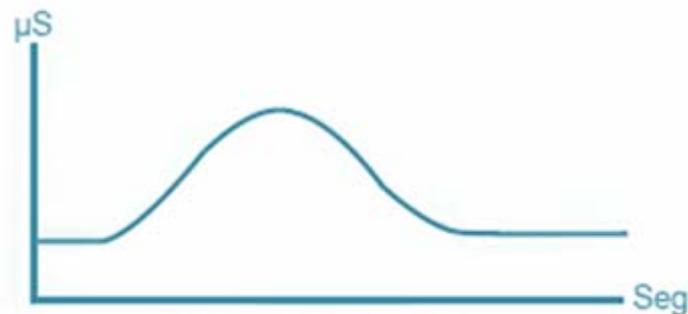
b) La sal pasó muy rápido. Emplear a más distancia



c) La sal no fue bien disuelta



d) Agregar más sal



e) Curva ideal

Figura 14. Tipos de gráficos obtenidos

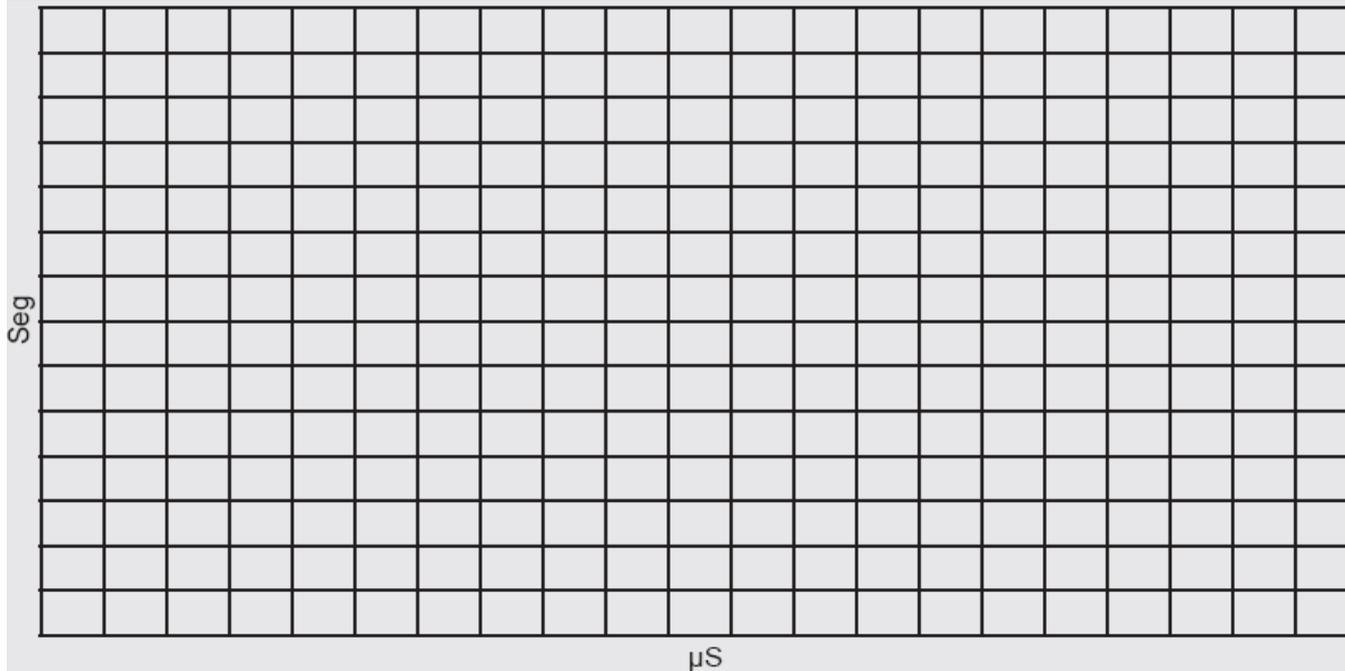
Ejemplo: calcular el caudal en una fuente de agua, si se tienen los siguientes datos:

Datos:

- Cantidad de sal: 125 g
- Temperatura del agua: 12 °C
- Conductividad base: 240  $\mu\text{S}$

T (seg)	$\mu\text{S}$
0.00	240
5	243
10	247
15	254
20	270
25	284
30	290
35	287
40	284
45	273
50	262
55	256
60	252
65	248
70	245
75	243
80	242
85	241
90	241
95	241
100	240

Gráfica de conductividad versus tiempo



Resultados:

Del gráfico se obtienen 66 cuadrados, cada uno de 5  $\mu\text{S}$  por 5 segundos

$$A = 66 \cdot 5 \mu\text{S} \cdot 5 \text{ s} = 1\,650 \mu\text{S por segundo}$$

De la figura 13b, a 12 °C el factor de corrección K es 1.62  $\mu\text{S}/\text{mg}/\text{litro}$ .

Entonces:

$$Q = k(M/A) = (1.62 \mu\text{S}/\text{mg}/\text{litro} \times 125\,000 \text{ mg})/1\,650 \mu\text{S por segundo}$$

$$Q = 122.72 \text{ litros/segundo}$$

## 1.2.1 MÉTODO DEL RECIPIENTE

El método del recipiente es una manera muy simple de medir el caudal. Todo el caudal a medir debe ser desviado hacia un balde o barril y se anota el tiempo que toma llenarlo. Como el volumen del envase se conoce, obtenemos el caudal simplemente dividiendo este volumen por el tiempo de llenado.

Para obtener mejores resultados en la estimación del caudal, se debe tomar varias veces el tiempo de llenado del recipiente, de manera que sea posible determinar el valor promedio.

La desventaja de este método es que todo el caudal debe ser canalizado o entubado al envase, lo cual puede resultar complejo, a menudo construir una pequeña presa temporal puede ser de una gran ayuda.

En vista de los problemas que se pueden presentar con grandes caudales es claro que este método resulta práctico solo para caudales pequeños.

## a. Equipo necesario

- Recipiente de capacidad conocida en litros, puede ser un balde, cilindro, etc.
- Cronómetro de precisión en segundos
- Pico y lampa (pala)
- Manta de plástico, plancha de calamina o tubo de PVC
- Libreta de notas y lapicero

## b. Procedimiento

- Haciendo uso de parte del equipo (pala y pico), desviar lateralmente el riachuelo, tratar de formar un canal provisional con la manta de plástico, plancha o tubo de PVC; aprovechar un desnivel para provocar una caída libre del chorro de agua
- Utilizando el cronómetro y con la ayuda de una segunda persona, medir el tiempo que demora en llenarse el recipiente seleccionado. Repetir el proceso un mínimo de tres veces

Se debe ubicar el tramo más adecuado para realizar la medición y luego encauzar la fuente para que la totalidad del agua caiga en el recipiente, de conformidad con la representación de la Figura

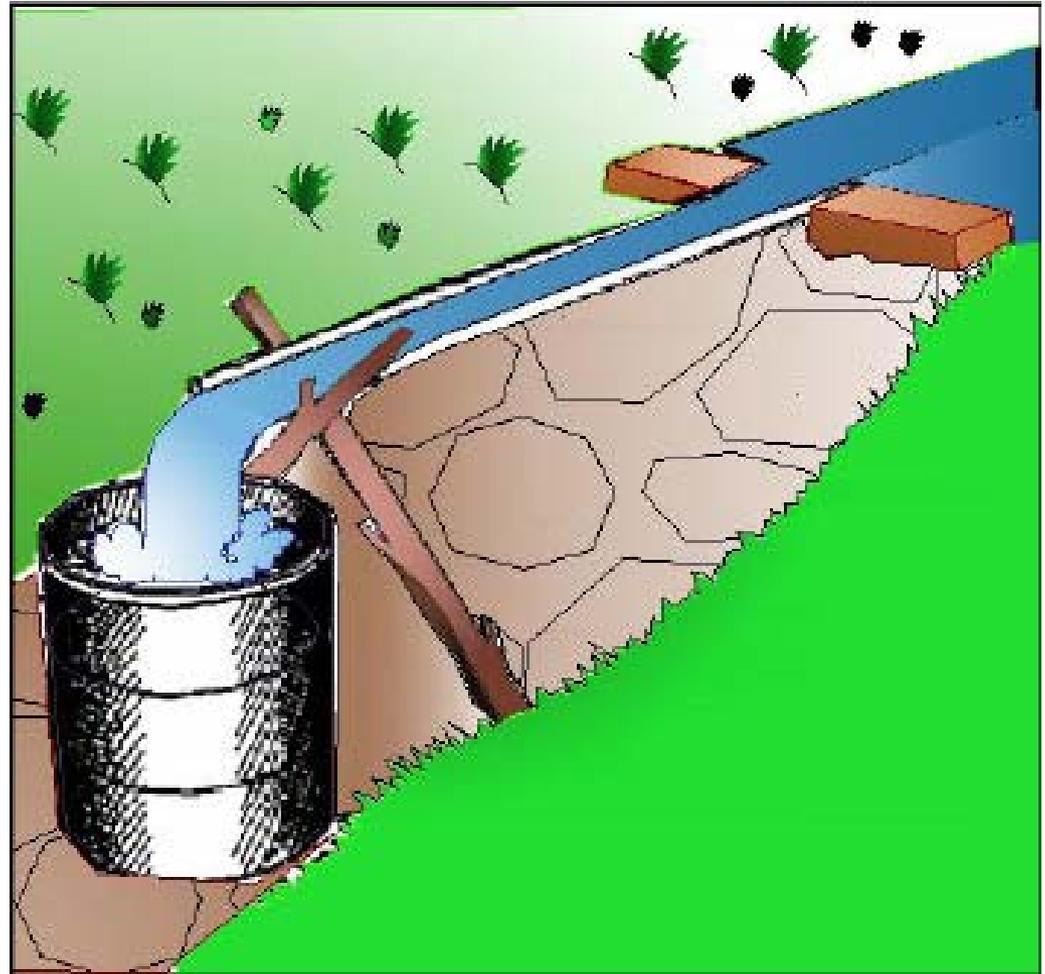


Figura 15. Medida del caudal usando el método del recipiente

Ejemplo: si se tienen los siguientes tiempos registrados en llenar un balde de 20 litros, calcule el caudal:

Tiempos registrados:     $T_1 = 4.5$  segundos  
                                   $T_2 = 4.8$  segundos  
                                   $T_3 = 4.9$  segundos

Cálculo del tiempo promedio:

$$T_p = \Sigma \text{tiempos} / N^\circ \text{ de tiempos}$$

$$T_p = (4.5 + 4.8 + 4.9) / 3 = 14.2 / 3 = 4.73 \text{ segundos}$$

Determinación del caudal:

$$Q = \text{volumen del recipiente} / T_p$$

$$Q = 20 \text{ litros} / 4.73 \text{ segundos}$$

$$Q = 4.23 \text{ litros/segundo}$$

c. Fórmulas empleadas en caso no se conozca el volumen del recipiente

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$$

Donde:

V = volumen del recipiente (m<sup>3</sup>)

D = diámetro del recipiente

H = altura del recipiente

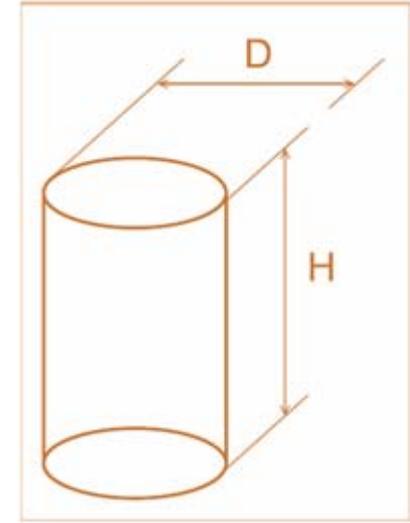


Figura 16. Volumen de un cilindro

$$V = \frac{\pi}{12}(D^2 + d^2 + D \cdot d) \cdot H$$

Donde:

V = volumen del recipiente (m<sup>3</sup>)

D = diámetro mayor del recipiente

d = diámetro menor del recipiente

H = altura del recipiente

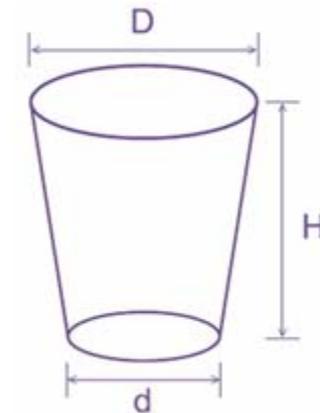


Fig. 17. Volumen de un tronco-cónico

## 2.2.3. Método del área y velocidad (flotador)

Este método se basa en el principio de continuidad. Para un fluido de densidad constante fluyendo a través del área de una sección conocida, el producto del área de la sección por la velocidad media será constante:

$$\text{Área} \times V_{\text{media}} = Q = \text{constante (m}^3/\text{s)}$$

Donde:

$$V_{\text{media}} = \text{velocidad promedio del agua en la corriente}$$

Este producto es igual al valor del caudal volumétrico (Q, en m<sup>3</sup>/s).

### a. El flotador

Se dibuja el perfil de la sección del lecho del río y se establece una sección promedio para una longitud conocida de corriente (ver figura 18).

Se utilizan una serie de flotadores (pedazos de madera, corchos, etc.) para medir el tiempo que se demoran en recorrer una longitud preestablecida en el río.

Los resultados son promediados y se obtiene la velocidad superficial del flujo de agua. Esta velocidad deberá ser reducida por un factor de corrección para hallar la velocidad media de la sección. Este factor depende de la profundidad de la corriente.

Multiplicando el área de la sección promedio por la velocidad del caudal promediada y corregida se obtiene el volumen de agua estimado que fluye. Las imprecisiones de este método son obvias. La fórmula para el cálculo es:

$$Q = k \cdot A \cdot V \quad (m^3 / s)$$

Donde:

A = área promedio de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

V = velocidad superficial del agua (m/s)

k = factor de corrección de velocidad según la relación s/p (ver tabla 11)

*El factor k también se puede obtener de la tabla 12, en función a la profundidad y el tipo de material del riachuelo.*

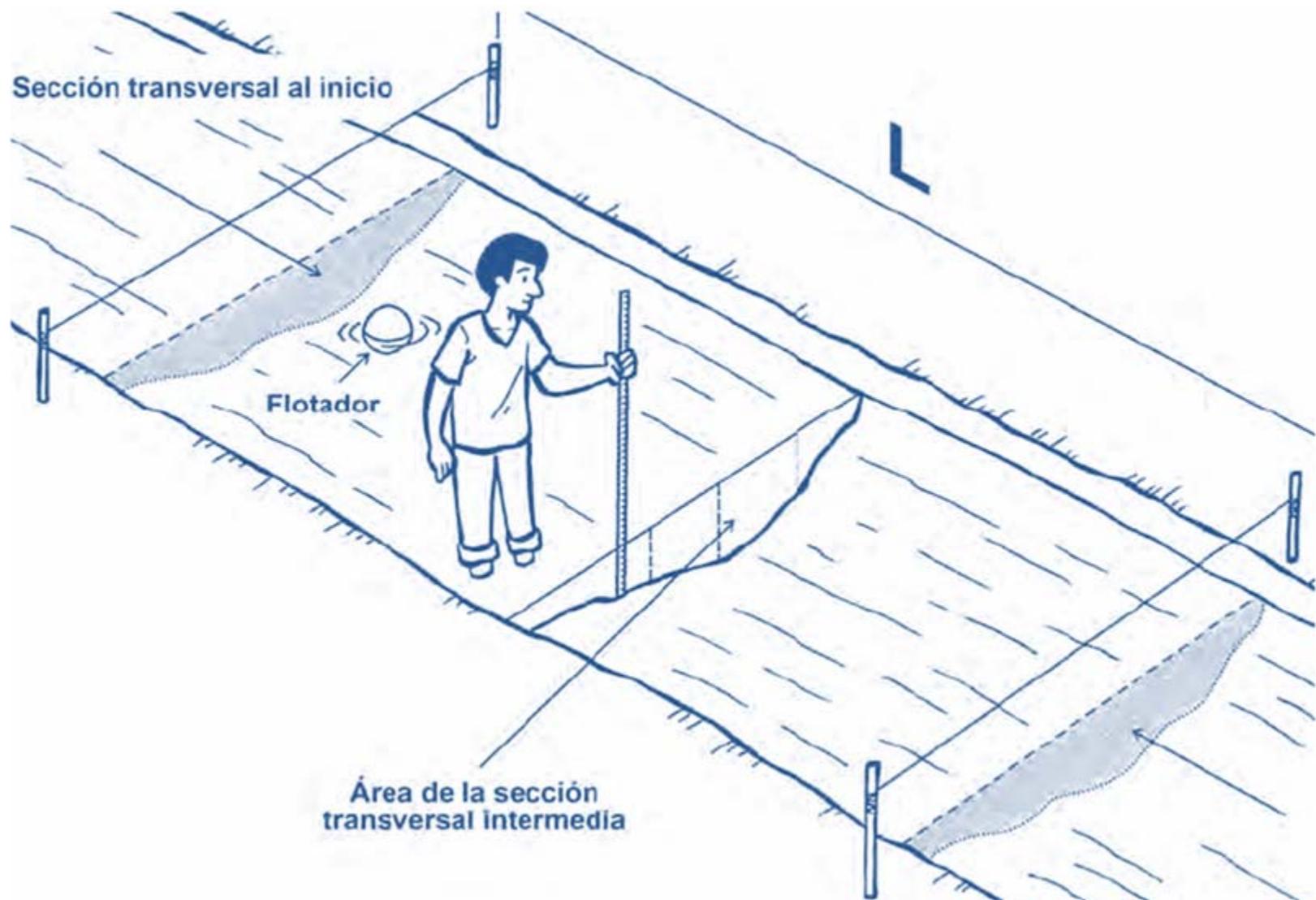
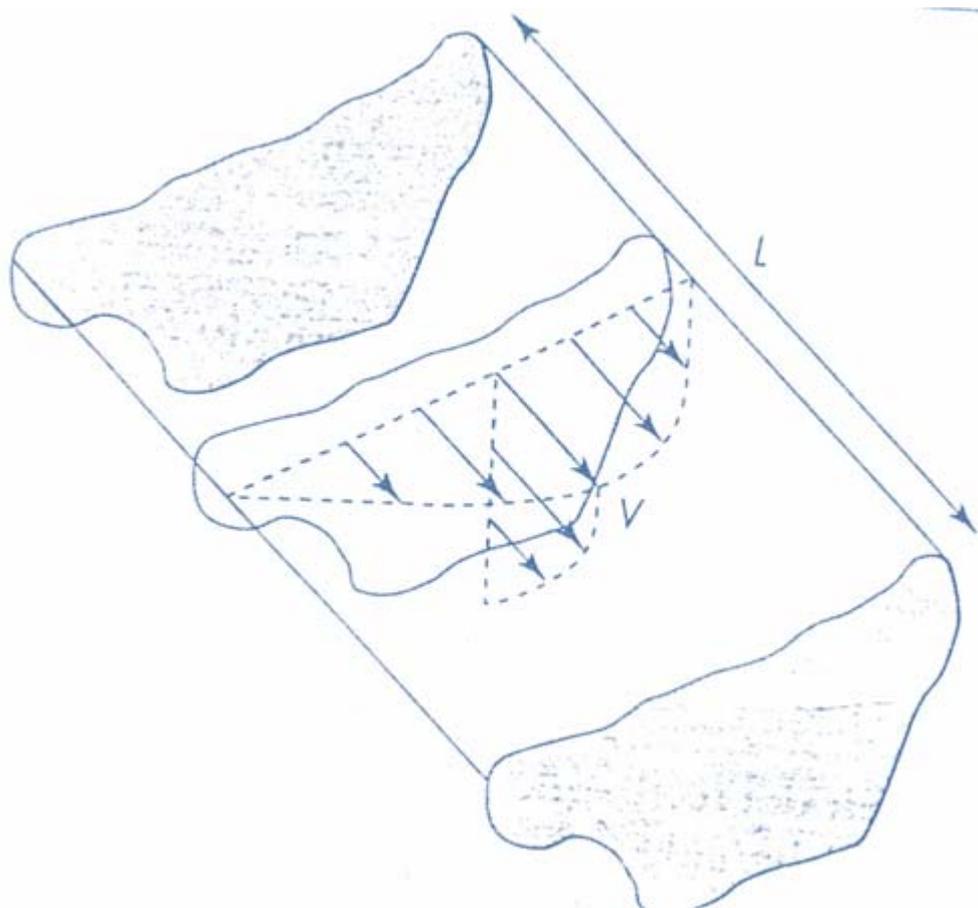


Figura 18. Sección transversal de la corriente



$$V = L / t$$

Como se observa en la figura , la velocidad no es homogénea en toda la sección transversal; por consiguiente, para determinar la velocidad media es necesario apoyarse en la tabla siguiente , la cual presenta coeficientes de flotación experimentales para diferentes lechos en función de la relación entre la sección transversal  $S$  y su perímetro  $P$ .

Tabla 11. Valores de k según la relación s/p y material del riachuelo

<b>S / P</b>	Madera lisa o cemento	Madera áspera o ladrillo	Pared de pedruscos	tierra
0.1	0.860	0.840	0.748	0.565
0.2	0.865	0.858	0.792	0.645
0.3	0.870	0.865	0.812	0.685
0.4	0.875	0.868	0.822	0.712
0.5	0.880	0.870	0.830	0.730
0.6	0.885	0.871	0.835	0.745
0.7	0.890	0.872	0.837	0.755
0.8	0.892	0.873	0.839	0.763
0.9	0.895	0.874	0.842	0.771
1.0	0.895	0.875	0.844	0.778
1.2	0.895	0.876	0.847	0.786
1.4	0.895	0.877	0.850	0.794

Donde:

S = sección transversal (m<sup>2</sup>)

P = perímetro mojado (m)

Tabla 12. Valores de k según la profundidad y el material del riachuelo

Tipo de canal o río	Profundidad del agua en el centro del lecho	Factor
Canal revestido con concreto	Mayor de 0.15 m	0.80
Canal de tierra	Mayor de 0.15 m	0.70
Rio o riachuelo	Mayor de 0.15 m	0.50
Riachuelos o canales de tierra	Menor de 0.15 m	0.50 a 0.25

## b. Equipo necesario

- Lampa y pico
- Estacas
- Cordel de nylon
- Winchas de 30 m y de 5 m
- Cronómetro
- Regla graduada en centímetros
- Flotador (maderas, botella plástica, corcho)
- Machete
- Libreta de notas y lapicero

## c. Procedimiento

- Seleccionar en el río o riachuelo un tramo recto y de sección uniforme
- Medir la longitud (L) en metros y colocar estacas
- Atar transversalmente el cordel a las estacas
- Determinar la velocidad superficial de flujo en el tramo seleccionado:
  - Calcular el tiempo que tarda el flotador en recorrer la longitud L con el cronómetro. Realizar este paso por lo menos 3 veces
  - Hallar el tiempo promedio  $T_p$
  - Calcular la velocidad superficial:  $V = L/T_p$

- Hallar el área de la sección transversal  $A$  en el centro del tramo seleccionado:
  - Medir el ancho del espejo de agua de la sección transversal
  - Dividir este ancho en partes iguales
  - Con la regla graduada, tomar lecturas de la profundidad en cada división marcada
  - Dibujar un croquis de la sección con los datos obtenidos
  - El área de la sección transversal estará dada por la suma de las áreas parciales. Para facilidad de cálculo, semejar a figuras conocidas como triángulos y trapecios, según sea el caso
  - Determinar el perfil  $p$  del croquis dibujado, el mismo que viene a ser el perímetro mojado
  
- Calcular el caudal  $Q$ , aplicando la fórmula  $Q = k \cdot A \cdot V$ , teniendo en cuenta los valores de  $A$ ,  $V$  y el factor  $k$  de la tabla 11.

Ejercicio: hallar el caudal de un riachuelo, conociendo los siguientes datos:

- Material: pedrusco h1= 0.00
- Espejo de agua: 3.50 m h2 = 0.30
- Profundidades en metros, tomadas a distancias iguales: h3 = 0.55
- Longitud  $L= 10.50$  m h4 = 0.45
- Tiempos  $T1 = 11.5$  s h5 = 0.25
- $T2 = 11.8$  s h6 = 0.10
- $T3 = 12.0$  s

Solución:

Croquis de la sección transversal:

A1 =

Cálculo de la sección transversal:

A2 =

A3 =

A4 =

A5 =

Cálculo del perímetro mojado:

P1 =

P2 =

P3 =

P4 =

P5 =

$$A = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 =$$

Cálculo de  $s/p =$

De la tabla 11,  $k =$

$$P = P1 + P2 + P3 + P4 + P5 =$$

$$\text{Cálculo del caudal } Q = k \cdot A \cdot V =$$

## 2.2.4. Método del vertedero de pared delgada

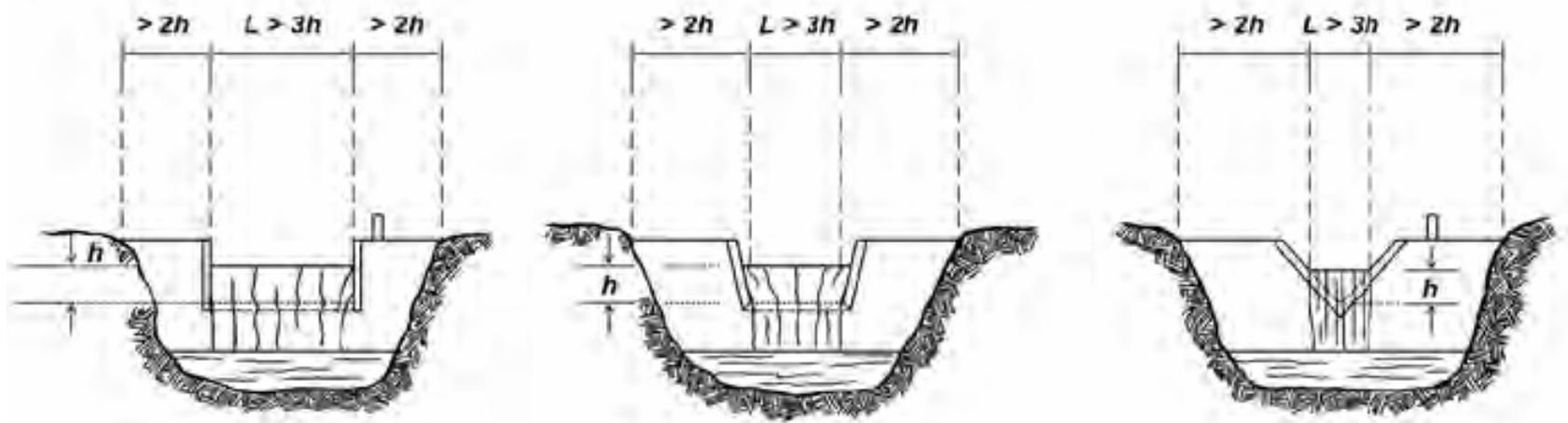
Un vertedero es una estructura similar a un muro de baja altura ubicado a lo ancho de un río o canal. Un vertedero de medición de caudal tiene una muesca a través de la cual toda el agua de la corriente fluye.

Los vertederos son generalmente estructuras temporales, diseñados de modo que la descarga volumétrica pueda ser leída directamente o determinada por una simple lectura de la diferencia de altura entre el nivel del agua antes del vertedero y en el vértice o cresta de este.

Para obtener buenos resultados es recomendable utilizar vertederos de pared delgada, se debe evitar que el sedimento se acumule tras de ellos. Estos vertederos se hacen con planchas de acero o de madera cepillada.

Según la forma de abertura adyacente al lado superior, los vertederos pueden ser triangulares, trapezoidales o rectangulares. Cada uno de ellos tiene su propia fórmula y condiciones específicas en cuanto a sus dimensiones (ver figura 20):

- El vertedero triangular mide descargas pequeñas con mayor precisión que los otros tipos
- El vertedero trapezoidal, llamado también Cipoletti, puede compensar las contracciones en los bordes con caudales reducidos, lo que introduce errores en las medidas de vertederos rectangulares. La fórmula para controlar la descarga se simplifica al eliminar el factor de corrección en los vertederos rectangulares
- El vertedero rectangular permite medir descargas mayores y su ancho puede ser cambiado para diferentes caudales



Vertedero rectangular

Vertedero trapezoidal

Vertedero triangular

$$Q = 1.8 (L - 0.2h) h^{1.5}$$

$$Q = 1.9Lh^{1.5}$$

$$Q = 1.4h^{2.5}$$

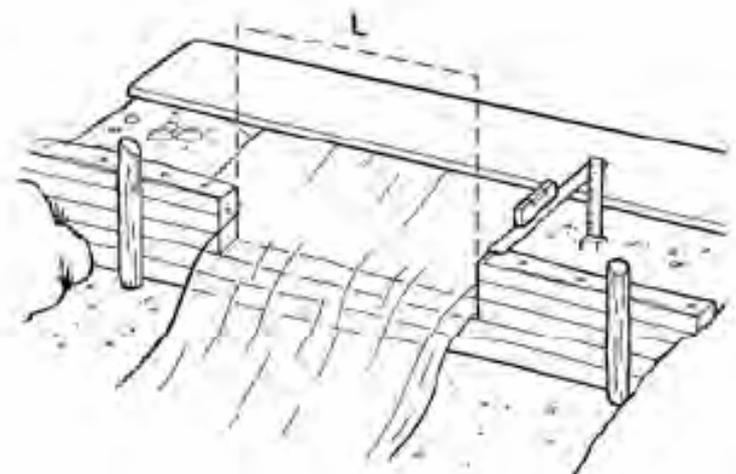
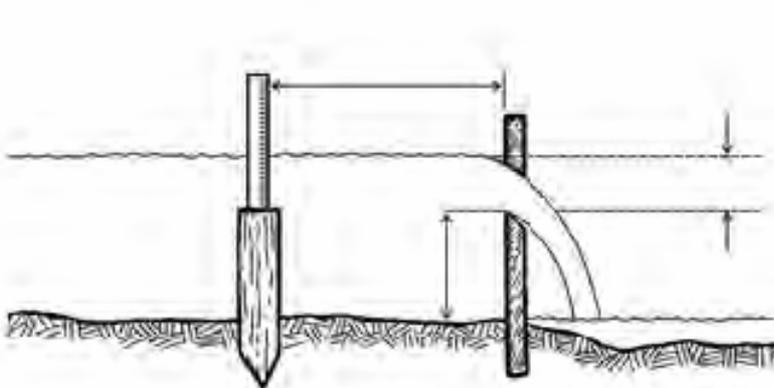
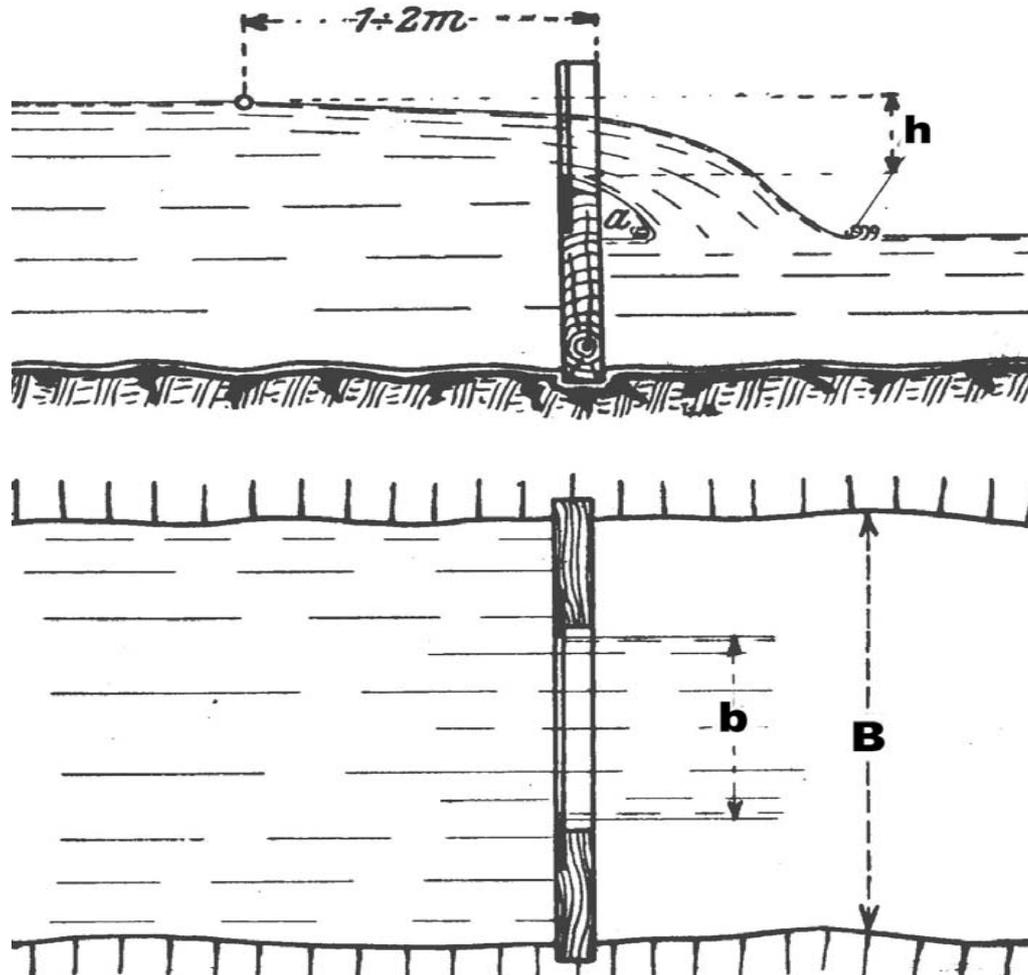


Fig. 20. Tipos y fórmulas para cálculo del caudal en los tres tipos de vertederos

## AFORO POR VERTEDERO EN PARED DELGADA

Se dispone, como más conveniente, un vertedero «completo», empotrándolo bien en el cauce del río. (fig.)



Los bordes del vertedero deben ser delgados y con preferencia de hierros planos biselados.

Hay que procurar, ante todo, que debajo del chorro se encuentre un espacio de aire **a** , toda vez que de no haberlo se falsean los resultados del aforo por los torbellinos que se forman; a este objeto, en el caso de que el ancho **b** sea igual al del río, se debe hacer penetrar artificialmente el aire por los lados por medio de un tubo.

El caudal **Q** se obtiene entonces así:

$$Q = \frac{2}{3} \mu . b . h \sqrt{2 . g . h}$$

**h** debe siempre medirse desde, un punto al que no llegue la influencia del vertedero, aproximadamente 2 m aguas arriba

El coeficiente  $\mu$  puede tomarse como valor medio =0,63, pero como a consecuencia de minuciosos ensayos se ha puesto en claro que juega cierto papel la relación entre el ancho del vertedero  $b$  y el ancho total del cauce  $B$ , es preferible calcular  $\mu$  según una fórmula establecida por **Braschmann**, que se aplica para valores de  $h \geq 0.1$  m y que se expresa así:

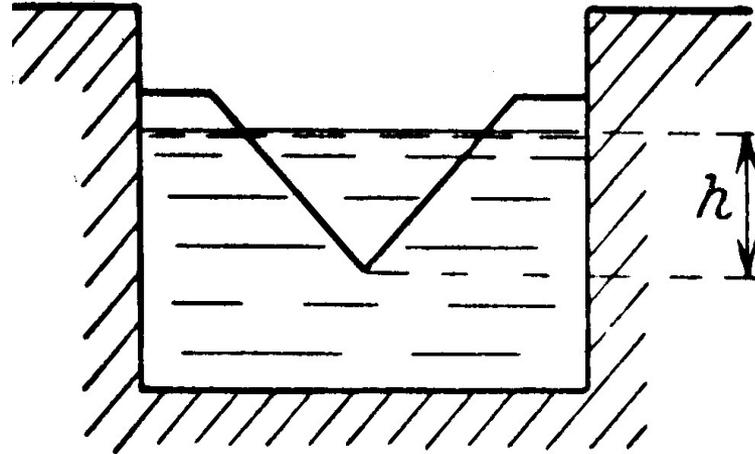
$$\frac{2}{3} \mu = 0.3838 + 0.0386 \frac{b}{B} + 0.00053 \frac{1}{h}$$

Otras fórmulas tienen en cuenta la relación de la altura  $t$  (medida desde el umbral del vertedero hasta el suelo) a la altura  $h$  ; así, por ejemplo, la fórmula de Rehbock

$$\mu = 0.605 + \frac{1}{1000h} + \frac{0.08.h}{t} \quad (\text{h y t medido en metros})$$

*Esta fórmula tiene aplicación únicamente en vertederos sin contracción lateral, o sea donde: **b = B**.*

Para pequeños aforos ( por bajo de  $0.5 \text{ m}^3 / \text{seg}$  ) se prefiere el vertedero triangular de *Thompson* ( fig.) con un corte de  $90^\circ$



El caudal se obtiene por la fórmula:

$$Q = 1.415 h^2 \cdot \sqrt{h}$$

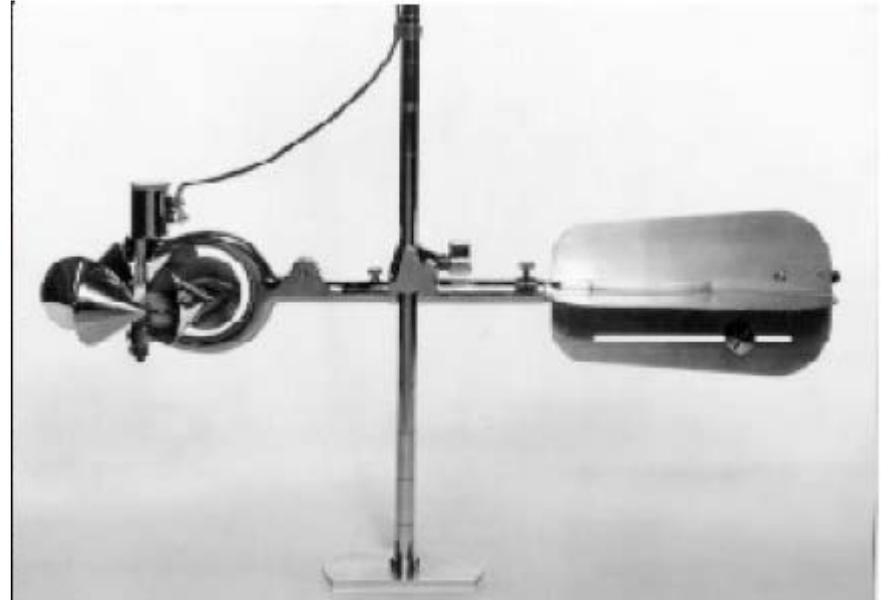
En la que **h** se mide desde el nivel del agua no afectado por el derrame hasta el vértice del ángulo que forma el vertedero. Las aristas de este deben ser también biseladas y el chorro salir bien libre a fin de no falsear los resultados.

## 2.2.5 MEDIDORES DE CORRIENTE O CORRENTÓMETROS

En este método, la velocidad del agua se mide por medio de un correntómetro o molinete, el cual consiste en un mango con una hélice o copas conectadas al final. La hélice rota libremente y la velocidad de rotación está relacionada con la velocidad del agua. Un contador mecánico registra el número de revoluciones del propulsor que se ubica a la profundidad deseada

Los correntómetros más empleados son los de hélice, de los cuales hay de varios tamaños; cuanto más grande sea el caudal o más alta sea la velocidad, mayor debe ser también el tamaño del aparato. Cada correntómetro debe tener un certificado de calibración en el que figura la fórmula necesaria para calcular la velocidad del agua sabiendo el número de vueltas o revoluciones de la hélice por segundo.

Los medidores de corriente son suministrados con una fórmula que relaciona la velocidad de rotación del instrumento con la velocidad de la corriente. Generalmente, estos aparatos son usados para medir velocidades de 1,2 a 5 m/s con un error probable de 2%.



Molinete de Woltmann

## 1.4 ESTUDIO HIDROLÓGICO

La hidrología tiene un papel muy importante en el planeamiento del uso de los recursos hidráulicos, a través de ella, podemos determinar la cantidad de agua que escurre un río a lo largo del año. A pesar de que puede presentar muchas variaciones debidas a las condiciones propias de la cuenca, tales como: cambios climáticos, topografía del terreno, área de la cuenca y las características geológicas de la cuenca.

Las mediciones ocasionales del caudal son referencias importantes que deben tomarse en cuenta, pero por sí solas no son suficientes para informarnos si el año será muy seco o muy lluvioso, o a qué niveles de caudal puede bajar el río en época de estiaje y hasta qué niveles podría subir en tiempo de avenidas.

Los estudios hidrológicos son fundamentales para el diseño de obras hidráulicas, pero debido a que la hidrología no es una ciencia exacta, por lo general las respuestas se dan en forma probabilística de ocurrencia. Donde frecuentemente los modelos matemáticos representan el comportamiento de la cuenca.

## 1.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

El registro de la variación del caudal a lo largo del año se toma de las estaciones de aforo, las cuales están ubicadas en el cauce de los principales ríos, generalmente las instituciones ambientales se encargan de llevar registro de esta información.

En muchas de las estaciones meteorológicas se toman los datos en forma interdiaria, ya que sin dudas un registro de aforos de varios años resulta de gran utilidad para predecir las variaciones estacionales de un caudal.

En caso de no contarse con esta información se puede realizar una estimación de los caudales sobre la base de información meteorológica en la cuenca. Este análisis consiste en elaborar primero tablas de frecuencias absolutas y relativas agrupando los datos en clases o rangos. La tabla de frecuencias relativas acumulativas representa en buena cuenta la curva de duración de caudales, como veremos a continuación.

## 1.5.1 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE CAUDALES

El histograma es una herramienta que permite representar gráficamente el comportamiento de un conjunto de datos en cuanto a su tendencia central, forma y dispersión.

Con base en el número de registros tabulados, asumiendo  $N_{\text{registros}} = 324$ , se establece el intervalo específico para el cálculo de la curva de caudales, así:

- Primero se calcula el Número de Clase,  $N_c$  :

$$N_c = 1 + 3,3 * \ln (N_{\text{registros}}) = 1 + 3,3 * \ln (324) = 20,08$$

- Segundo se determinan los caudales máximo y mínimo:

$$Q_{\text{máx}} = X_{\text{máx}} = 7,17 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{y} \quad Q_{\text{min}} = X_{\text{min}} = 0,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

- El intervalo  $[\Delta x]$ , se calcula con base en la siguiente expresión:

$$\Delta x = (X_{\text{máx}} - X_{\text{min}}) / (N_c - 1) \approx 0,35$$

Una vez calculado el intervalo de cada frecuencia, procedemos a elaborar el cuadro de distribución de frecuencias, ver Tabla 1-2.

Debe entenderse que para realizar dicho procedimiento es necesario contar con un registro histórico de los caudales del río o quebrada a estudiar.

Por ejemplo, para realizar una valoración adecuada acerca del caudal de diseño de la quebrada La vertiente, es necesario contar con esta información. En la Tabla 1-1 puede apreciarse una serie de caudales mensuales de dicha cuenca, cabe aclarar que la “existencia” de esta quebrada es sólo para efectos ejemplificar el procedimiento, así mismo su registro de caudales.

Tabla 1-1  
Registros de los  
caudales medios  
mensuales de la

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
83	1.21	1.56	2.04	2.45	2.93	3.68	2.37	2.74	3.90	3.61	4.71	3.46
84	1.61	1.32	0.83	0.91	1.76	2.47	2.55	3.40	3.40	5.09	3.26	3.21
85	2.48	2.29	1.92	2.58	3.03	3.47	5.64	4.00	3.35	3.08	2.49	3.52
86	6.95	6.36	1.92	2.65	2.97	1.80	1.83	1.90	1.64	4.13	3.58	3.37
87	1.10	1.57	1.62	3.31	1.53	1.75	1.81	2.19	2.36	3.67	2.70	4.43
88	1.14	2.51	2.25	2.50	5.58	5.26	3.70	5.52	7.17	4.83	2.57	4.56
89	2.07	1.53	0.85	2.93	4.78	3.08	3.87	4.83	4.51	4.11	3.13	2.52
90	1.70	1.76	2.38	2.83	3.97	2.33	2.26	2.57	2.44	3.22	2.94	2.72
91	1.16	1.54	1.27	1.57	2.53	2.08	1.85	2.47	3.25	4.43	3.98	2.34
92	0.95	1.24	1.68	2.42	4.53	3.13	3.44	3.32	3.62	3.48	3.26	2.82
93	1.39	1.77	0.97	0.74	4.68	2.14	2.84	2.37	3.11	3.03	2.81	1.88
94	0.77	1.06	1.10	1.29	1.72	2.23	3.72	2.34	2.44	2.93	2.08	1.88
95	1.66	1.35	1.74	2.43	4.22	3.27	3.22	2.09	2.26	2.59	1.81	3.14
96	1.11	1.09	1.42	1.56	1.97	1.34	1.67	1.83	2.28	1.88	2.13	1.30
97	0.81	1.04	1.37	1.55	1.82	1.29	1.65	2.17	2.37	2.15	1.76	1.71
98	0.89	1.14	1.90	2.34	1.64	1.59	1.83	1.80	1.81	2.03	3.34	3.18
99	0.75	1.07	1.47	1.40	1.29	1.65	1.98	1.61	2.50	2.60	2.87	2.74
00	2.10	1.96	2.51	2.44	2.34	2.06	2.30	2.81	2.58	3.40	2.37	2.07
01	1.68	1.62	1.42	1.97	3.23	2.45	1.92	1.67	2.10	1.72	1.37	1.37
02	0.67	0.86	1.58	2.46	3.70	3.31	2.30	3.22	3.68	3.77	2.98	2.60
03	1.36	2.02	2.62	3.66	4.06	5.09	1.98	1.48	2.48	3.26	2.05	1.81
04	1.66	2.08	2.64	3.18	4.99	2.80	2.76	3.16	2.70	2.45	1.75	1.37
05	1.13	1.07	1.39	1.21	4.77	2.59	2.46	2.74	3.40	3.30	2.39	2.22
06	1.42	1.14	1.21	1.47	3.59	1.90	1.64	1.19	1.37	1.41	1.34	1.31
07	0.62	1.03	1.03	1.44	1.96	2.59	2.35	0.94	0.55	2.16	1.91	1.78
08	0.92	1.33	2.06	1.72	1.36	1.50	1.58	2.63	2.04	2.79	2.27	1.52
09	1.07	1.14	1.39	1.74	3.91	2.38	2.16	2.72	3.01	2.14	2.76	1.52

**Tabla 1-2 Cuadro de distribución de frecuencias**

Cuadro de distribución de frecuencias						
Ítem	Intervalo		Q min	Fcia Núm.	Fcia Acumulada	Probabilidad de Permanencia
	Lim inf	Lim sup	(inter)			
1	0,55	0,89	0,55	10,00	324,000	100,00
2	0,89	1,24	0,89	27,00	314,000	91,67
3	1,24	1,59	1,24	44,00	287,000	78,09
4	1,59	1,93	1,59	51,00	243,000	62,35
5	1,93	2,28	1,93	37,00	192,000	50,93
6	2,28	2,63	2,28	49,00	155,000	35,80
7	2,63	2,98	2,63	26,00	106,000	27,78
8	2,98	3,32	2,98	24,00	80,000	20,37
9	3,32	3,67	3,32	19,00	56,000	14,51
10	3,67	4,02	3,67	12,00	37,000	10,80
11	4,02	4,36	4,02	4,00	25,000	9,57
12	4,36	4,71	4,36	7,00	21,000	7,41
13	4,71	5,06	4,71	5,00	14,000	5,86
14	5,06	5,41	5,06	3,00	9,000	4,94
15	5,41	5,75	5,41	3,00	6,000	4,01
16	5,75	6,10	5,75	0,00	3,000	4,01
17	6,10	6,45	6,10	1,00	3,000	3,70
18	6,45	6,79	6,45	0,00	2,000	3,70
19	6,79	7,14	6,79	1,00	2,000	3,40
20	7,14	7,49	7,14	1,00	1,000	3,09

En la Tabla 1-2 se puede observar el procesamiento estadístico de los datos. En las primeras columnas se encuentran los rangos de caudales seguidos de la frecuencia absoluta de cada rango y, posteriormente, la frecuencia acumulativa y, finalmente, en la última columna está la probabilidad de permanencia de dicho caudal.

Para calcular la frecuencia relativa se divide el número de ocurrencias entre el número total de aforos.

$$Fr (\%) = \frac{F}{N} \times 100$$

De esta manera la probabilidad de permanencia para el ítem 2 será:

$$100 - \frac{27}{324} \times 100 = 91.67$$

Se procede de esta manera hasta el último intervalo.

En la primera columna los datos se han ordenado de menor a mayor con el fin de facilitar la interpretación de la curva de duración y la gráfica de la misma.

En términos prácticos, la frecuencia relativa acumulativa viene a ser la duración en términos de porcentaje.

## 1.5.2 CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES

La curva de duración es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal,  $Q$ , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal,  $Q$ , es excedido o igualado, como abscisa.

La ordenada  $Q$ , para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio que se espera sea excedido o igualado por un porcentaje,  $P$ , del tiempo.

Los datos de caudal medio anual, mensual o diario se pueden usar para construir la curva, estos se disponen en orden descendente, usando intervalos de clase si el número de valores es muy grande.

Esta curva nos da la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el período de aforos, en el que el caudal es igual o menor al caudal correspondiente ha dicho porcentaje de tiempo.

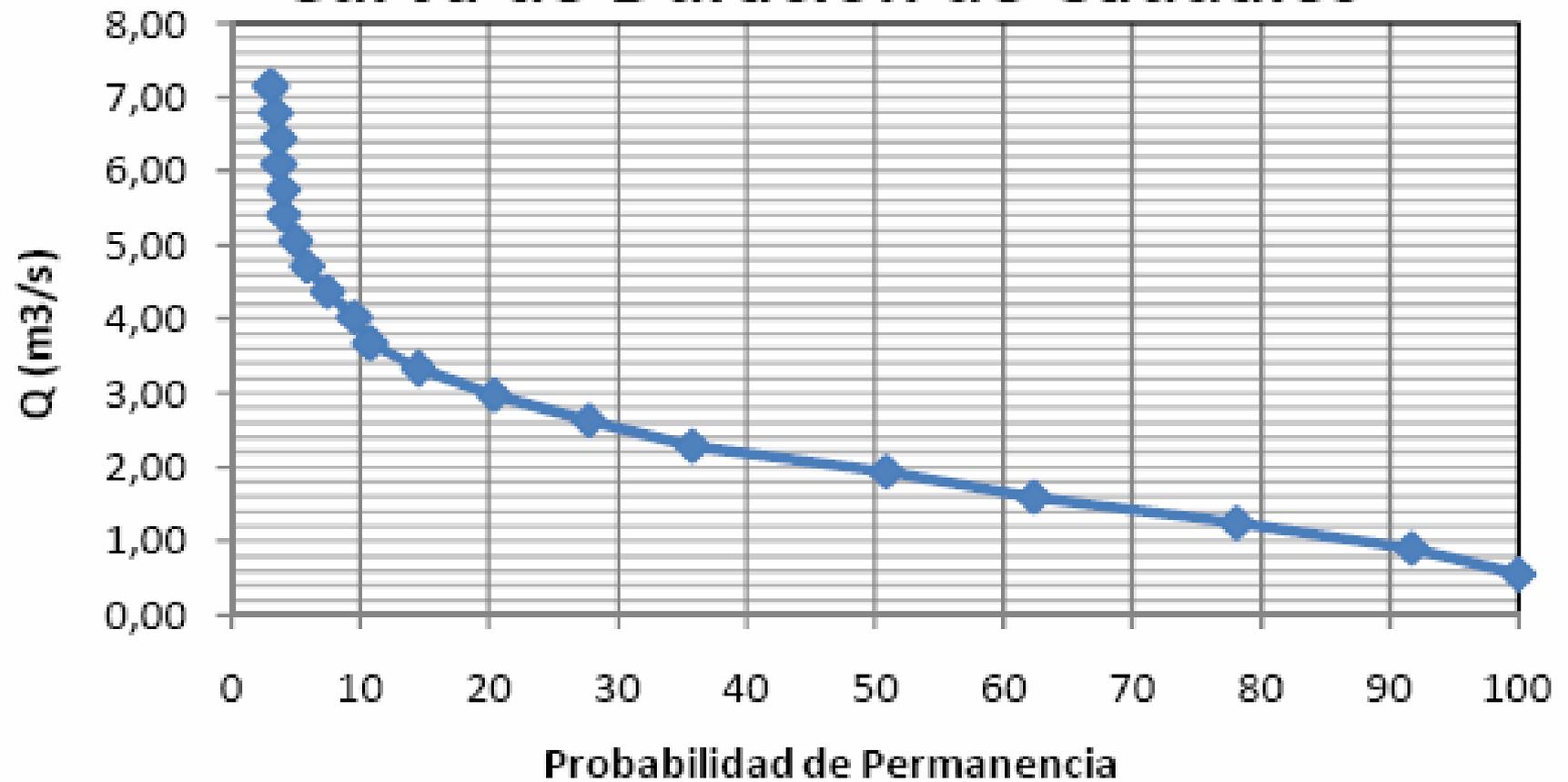
El caudal medio se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_m = I, Q_j \times fr / 100$$

Después de elaborar la curva de duración dependerá del diseñador y de sus necesidades decidir sobre cuál será el caudal de diseño a usar en el proyecto. Evidentemente, si queremos que la central trabaje el 100% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño será muy pequeño (0,55 m<sup>3</sup>/s). Si esto no es importante y queremos que trabaje un 40% de tiempo a plena carga, el caudal de diseño o disponible para el diseño será mucho mayor (2,2 m<sup>3</sup>/s).

Existen otros procedimientos para el cálculo del caudal de diseño, en los que la información meteorológica siempre va a resultar de gran ayuda, porque la hidrología de una cuenca depende de condiciones climáticas como: la precipitación, la humedad, la temperatura y velocidad del viento.

## Curva de Duración de Caudales



Otros métodos como el de Penman estima el valor de la evaporación potencial de una superficie libre de agua con base en datos climatológicos. Ese valor estimado multiplicarse por un factor, obtenido empíricamente, puede tener la evapotranspiración potencial de una zona determinada.

El caudal del río varía durante el año, pero la PCH está diseñada para captar un caudal constante. La bocatoma debe, en lo posible, derivar el caudal adecuado hacia el canal, sea que el río tenga mucha o poca cantidad de agua. La función principal del barraje es asegurar que el caudal del canal se mantenga, incluso en época de estiaje.