

Curso de

“Aforadores de corrientes de agua”



Autor: Ing. en Rec. Hídr. (M.Sc.) Mario Basán Nickisch

- 2.008 -

INTA-EEA Santiago del Estero

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAUDAL DE UNA CORRIENTE DE AGUA	3
AFOROS DE CURSOS DE AGUA	5
MÉTODOS USADOS PARA MEDIR EL AGUA	6
Aforo volumétrico	7
Aforo de cañerías en pozos de agua	10
Aforo utilizando estructuras aforadoras	12
Aforo en compuertas	12
Placa aforadora	16
Vertederos	19
Aforadores de resalto	21
Aforador Parshall	21
Aforador de cresta ancha	24
Aforos por sección y velocidad	32
Aforos con flotadores	34
Aforos con molinete hidrométrico	39
Tareas preliminares en un aforo con molinete hidrométrico	43
Diferentes maneras de efectuar un aforo con molinete hidrométrico	48
Método por vadeo	48
Método desde pasarelas o puentes	49
Método del telestérico o cable-vagoneta	50
Condiciones que debe cumplir el curso de agua que se quiere aforar con molinete hidrométrico	51
Cálculo de aforos – Tareas de Gabinete	53
Método de la sección media	53
Método de la semisección	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

MEDICIÓN DEL AGUA CON DISTINTOS PROPÓSITOS

INTRODUCCIÓN:

La necesidad creciente de utilizar toda el agua disponible, aún en las regiones húmedas, y el aumento en los costos para desarrollar nuevas fuentes de agua hacen necesario que ésta sea aprovechada con menores costos y sin desperdicio. *Esto no puede lograrse si no se utilizan sistemas de medición adecuados.*

En nuestra región esa situación recrudece aun en mayor medida, ya que tiene características semiáridas y el régimen de lluvias se concentra en el verano, existiendo en el resto del año escasas a nulas precipitaciones.

Esto hace que para manejar el recurso hídrico de un curso de agua (río, canal, etc.) con distintos propósitos (agua potable, energía, riego, atenuación de crecidas, etc.) de una manera eficiente, *requiera del conocimiento de la cantidad de agua que pasa por un lugar en un tiempo determinado* (el caudal), durante un período de años lo más largo posible.

De allí que es menester *lograr datos de campo confiables y lo suficientemente precisos* que nos permitan estudiar y proyectar manejos del agua con el menor grado de incertidumbre posible para satisfacer las demandas cada vez más crecientes que tiene la Humanidad.

Así, para una utilización eficiente del recurso hídrico de un curso de agua en su área de influencia, como primer paso se deben colocar las necesarias estaciones de medición del caudal (Estaciones de Aforos). Esto es imprescindible para todo estudio de acondicionamiento hidráulico de una cuenca.

Esto último conlleva a *propender a la formación de Técnicos capacitados en medición de cursos de aguas naturales y artificiales*, que permitan obtener los datos básicos de cantidad de agua que pasa, para poder tomar las decisiones de manejo más adecuadas.

Ese conocimiento es esencial para determinar:

- La capacidad de un embalse o presa que permita atenuar las crecidas de los ríos.
- La dotación de agua que podemos abastecer, ya sea para consumo humano, como para riego y/o abrevado animal.
- La cantidad de energía hidroeléctrica que puede generar el turbinado de agua.
- Las dimensiones y diseño de la planta de bombeo de un pozo o perforación, midiendo el agua que descarga una bomba de prueba.

En el caso específico de un canal es preciso saber como aforar caudales en el mismo para:

- controlar el volumen de agua que fluye, evitando que reciba más agua de la que puede conducir, y para regular la entrada con las necesidades aguas abajo.
- determinar las pérdidas por conducción y localizar fugas, como también para distribuir el agua en su recorrido.

¿Es importante medir el agua de riego?

En el caso de riego, los conocimientos actuales de la relación agua-suelo-planta, permiten prever un uso eficiente del agua mediante la aplicación en el momento oportuno y en volúmenes adecuados, basados en la capacidad de infiltración del suelo. Estos conocimientos pueden ser usados efectivamente cuando se está capacitado para medir el agua con una exactitud razonable.

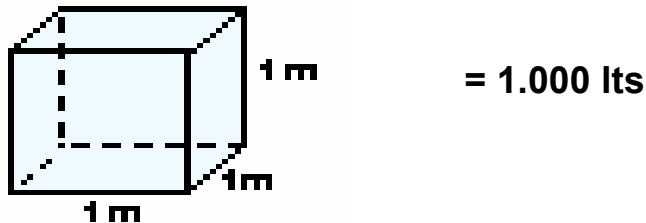
La única forma que tiene el productor de saber si se le entrega el agua que le corresponde es aforando el agua que entra a su propiedad. Cuando se riega, se debe conocer la cantidad que hay que agregar a un cultivo, para que éste produzca adecuadamente sin desperdiciar el recurso.

CAUDAL DE UNA CORRIENTE DE AGUA:

El caudal o gasto de una corriente es el volumen de agua que pasa por una sección transversal del cauce o canal en un tiempo dado, normalmente en la unidad de tiempo.

Las unidades empleadas para el caudal son metros cúbicos por segundo (m^3/s), o litros por segundo (lts/s), donde:

$$1 m^3 = 1.000 \text{ lts de agua (Volumen)}$$



es decir, que si queremos pasar caudales expresados con volúmenes distintos hay que transformarlos. Por ejemplo, si sabemos que por un canal pasa $1,5 m^3/s$, y queremos expresarlo en lts/s, debemos multiplicar por 1.000:

$$1,5 m^3/s \times 1.000 = 1.500 \text{ lts/s}$$

Lo inverso es tener el caudal expresado en lts/s y queremos expresarlos en m^3/s . Acá se debe dividir por 1.000. Por ejemplo si tengo un canal que lleva 200 lts/s, implica que:

$$200 \text{ lts/s} / 1.000 = 0,2 m^3/s$$

lo cual quiere decir que con el agua que pasa por ese canal puedo llenar un tacho de 200 lts en 1 segundo.

De igual manera se trabaja con el tiempo, ya que el caudal aforado normalmente lo expresamos por segundo (nos da idea del momento, de lo instantáneo). Pero puede interesar cuanta agua entra a un campo que estamos regando en 4 horas con ese canal del ejemplo anterior ($0,2 m^3/s$).

Entonces nos debemos preguntar: si en 1 segundo entran $0,2 m^3$, ¿cuánta agua entrará en 4 horas?

1 hora tiene 3.600 segundos, implica que:

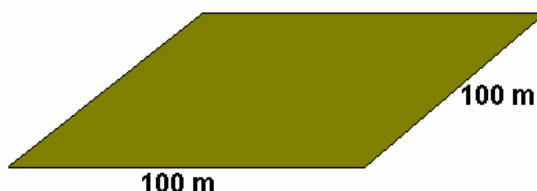
$$0,2 \text{ m}^3/\text{s} \times 4 \text{ horas} \times 3.600 \text{ segundos} = 2.880 \text{ m}^3$$

lo cual quiere decir que con una acequia que lleva $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, habilitándola 4 horas para regar ese campo, estamos introduciendo 2.880 m^3 de agua.

En el manejo del agua para riego, se necesita saber de que caudal se dispone y cuanta superficie se necesita regar.

La superficie de un campo normalmente se la expresa en hectáreas (Has):

$$1 \text{ Ha} = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 10.000 \text{ m}^2$$



En el ejemplo anterior supongamos que el campo regado tiene 6 hectáreas (60.000 m^2). Sabemos que se han aplicado 2.880 m^3 de agua en 4 horas. La pregunta es ¿qué lámina de riego se aplicó?, o ¿a qué cantidad de milímetros de lluvia equivale ese riego?

Sabemos que: $\text{Volumen} = \text{Superficie} \times \text{altura}$

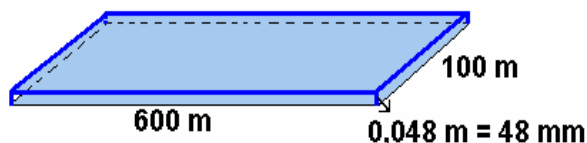
como nos interesa la altura de agua aplicada, se despeja ese término:

Altura de agua aplicada = Volumen de agua / Superficie regada

$$\text{Altura de agua aplicada} = 2.880 \text{ m}^3 / 60.000 \text{ m}^2 = 0,048 \text{ m}$$

como $1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$, implica que $0,048 \text{ m} = 48 \text{ mm}$

Quiere decir que con lo que se ha regado equivale a que haya llovido 48 mm en ese campo:



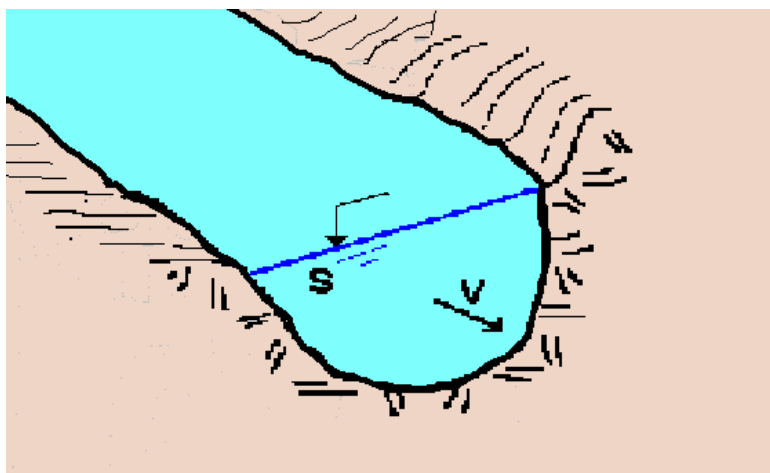
AFOROS DE CURSOS DE AGUA

Aforar una corriente de agua es determinar en un momento dado el valor del caudal. A esta operación se la llama aforo, y la/s persona/s que la realiza aforador.

Aforo se denomina a todas las Tareas de Campo y Gabinete que nos permiten determinar el caudal que pasa por una sección.

El caudal depende directamente de la superficie (S) de la sección transversal de la corriente de agua y de la velocidad media del agua (V), obteniéndose el caudal o gasto (Q) por medio de la multiplicación de ambos factores :

$$Q = S \times V$$



La superficie de la sección transversal de la corriente, como su velocidad, varían con la altura de agua, por lo cual, una vez conocida esa relación, *pueden obtenerse los caudales por medio de las alturas de agua registradas en escalas colocadas en forma apropiada.*

De allí la importancia de relacionar la altura del agua con el caudal, ya que resulta más práctico y rápido medir la primera que el segundo. Esta relación periódicamente debe ser revisada y, si es necesario, actualizada.

MÉTODOS USADOS PARA MEDIR EL AGUA

El grado de exactitud en la medición de un curso de agua depende del esfuerzo que se ponga en realizar la tarea y de los elementos de que se disponga.

La selección del método dependerá del volumen a medir, de las condiciones bajo las cuales deben efectuarse las medidas y de la exactitud requerida.

El equipo o los elementos de que se disponga para aforar juega un rol importante.

Existen distintos métodos:

- Aforo volumétrico.
- Aforo de cañerías en pozos de agua.
- Aforo utilizando estructuras aforadoras.
- Aforo por sección y velocidad.
- Aforo químico.
- Aforo utilizando fórmulas empíricas.

de los cuales nos ocuparemos con mayor profundidad de los distintos tipos de aforos por sección y velocidad.

El aforo químico se aplica en casos especiales donde no se puede determinar la sección o la velocidad (por ejemplo, ríos de montaña).

Mientras que la utilización de fórmulas empíricas requiere de datos de campo (sección, radio hidráulico, pendiente del agua, características del cauce, etc.) que dependerá de cada autor de esas fórmulas, permitiendo calcular el caudal con un cierto grado de incertidumbre, que luego deberá ser corroborado con métodos más confiables.

Tanto el aforo químico como el de utilización de fórmulas empíricas no se verán en este Curso por no responder a los objetivos específicos del mismo.

Aforo volumétrico :

Consiste en determinar el tiempo que tarda una corriente de agua en llenar un recipiente de volumen conocido.

Responde a la fórmula:

$$Q = \text{Volumen} / \text{tiempo}$$

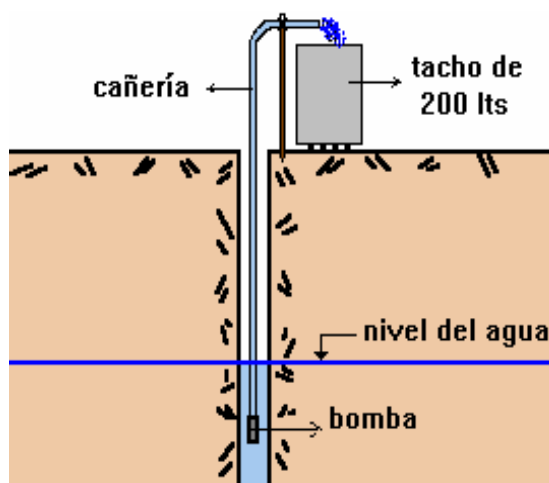
Es un método sencillo, exige poco equipo y es muy preciso si se aplica con un cuidado razonable.

Mientras más grande sea el depósito, mayor será el tiempo necesario para llenarlo y más precisa la medición.

Si se mide el tiempo con un cronómetro con error de 0,2 segundos, el error se minimiza tomando tiempos mayores a 60 segundos (1 minuto).

Se puede construir un recipiente de fórmula sencilla, por ejemplo prismático (tipo caja de zapatos), donde el volumen será : largo x ancho x altura. Hay que hacerlo de manera que el ascenso del agua sea más o menos lento (para poder ver bien cuando se llena).

Este tipo de aforos se utiliza generalmente en ensayos de bombeo de perforaciones o pozos, para determinar el rendimiento de dichas obras.

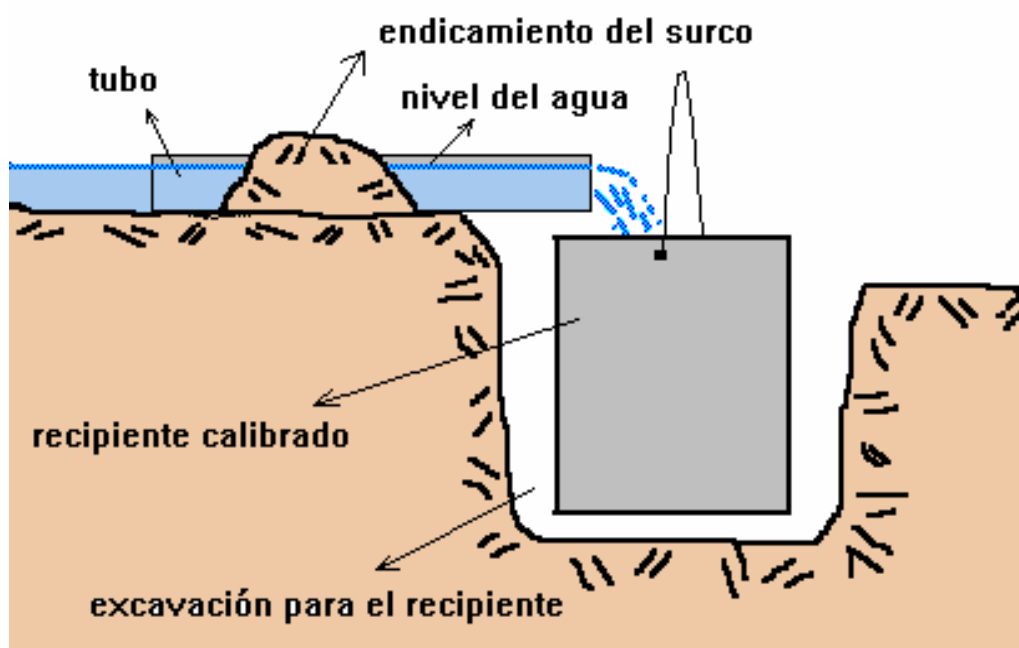


Cuando se afora con un tacho de 200 lts, sobre todo si se lo hace con una electrobomba o una bomba centrífuga se levanta la manguera y se le coloca un soporte fijándola para que no existan variaciones de caudal.

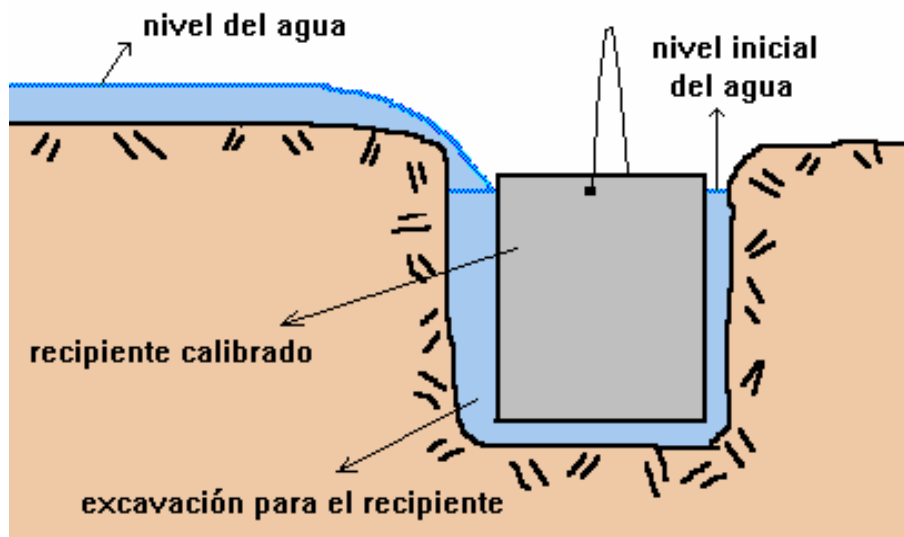
Es importante poner un entablado como base para tener el suelo firme y nivelado, por lo tanto tendremos la boca del tacho nivelada.

En el caso de riego hablamos de volúmenes menores, donde lo común es medir la corriente de los surcos. También se lo utiliza para medir la cantidad de agua en las boquillas de salida de los sistemas de aspersión.

Para la medición volumétrica de corrientes en los surcos, el agua debe fluir, generalmente, a través de un tubo o cañería pequeña, ubicado de tal manera que permita la fácil descarga en el recipiente.



Cuando existan inconvenientes por terrenos demasiado llanos, para no obstaculizar la corriente, se puede utilizar el método anterior modificado, como se muestra en la figura:



En este último caso puede apreciarse que el agua no va directamente al recipiente, sino que se dirige a la excavación hecha para colocar el recipiente. Lo que primero se hace es desaguar el pozo hasta que el líquido quede por debajo de la boca del recipiente calibrado. Cuando el agua llega al borde, comienza a derramarse dentro del depósito y allí se hace andar el cronómetro hasta pararlo cuando llega a la marca prefijada de llenado.

Como el nivel del agua en el pozo debe elevarse siempre un poco sobre el borde hasta que comienza a entrar en el recipiente, esto da lugar a un error. Éste será directamente proporcional a la cifra en que el área de pozo exceda a la del recipiente, o sea que la sección del sumidero debe reducirse al mínimo posible, empleándose este método solamente para flujos que requieran como mínimo 10 segundos para colmar el recipiente. Para flujos pequeños (que requieran 20 segundos o más para llenar los recipientes) y las áreas de los pozos menores de un tercio de la superficie del depósito, el error no tendrá importancia.

La medición de agua mediante el método volumétrico puede lograrse satisfactoriamente con gran variedad de equipo, siendo recomendable para el estudio común de entrada de flujo en surcos:

- Tubos para cursos de 75 mm de diámetro y 75 cm de largo.
- Recipientes de 10 a 20 lts de capacidad.
- Cronómetros con un margen de variación de 0,2 segundos.
- Tablas para computar los datos de las pruebas.

Aforo de cañerías en pozos de agua:

Cuando se necesita aforar cañerías horizontales, estén total o parcialmente llenas, se utilizan las siguientes fórmulas:

- Para caño totalmente lleno el caudal se obtiene con la fórmula:

$$Q = \text{Sup} \times \text{Vel}$$

Donde:

Q = caudal [m³/seg].

Sup = superficie transversal del caño [m²].

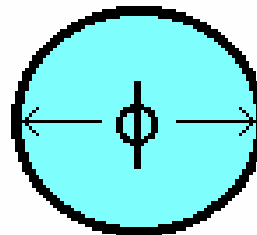
Vel = velocidad media en el caño [m/seg].

La superficie se obtiene con la fórmula:

$$\text{Sup} = 3,1416 \times \phi^2 / 4$$

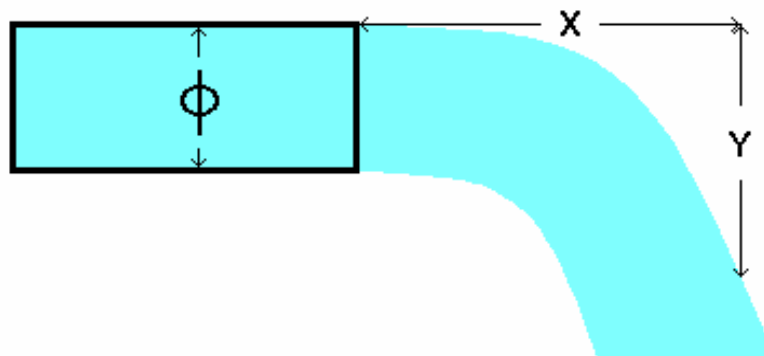
Siendo:

ϕ = diámetro del caño [m].

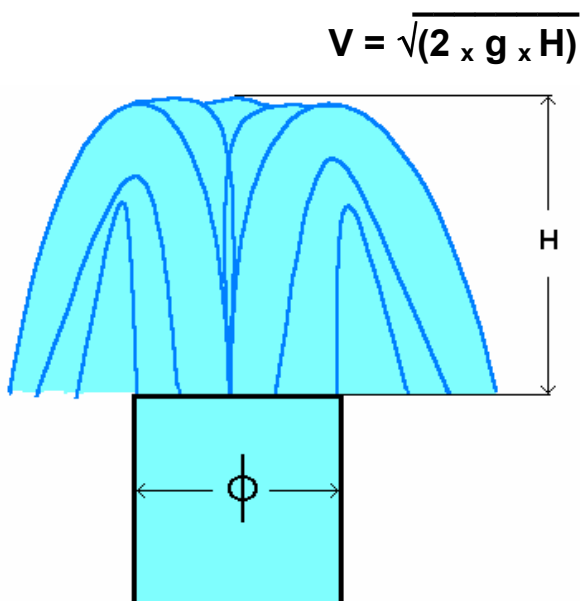


Y la velocidad para caño horizontal:

$$V = \sqrt{[g \times X^2 / (2 \times Y)]}$$



Mientras que para caño vertical:



Ejemplo:

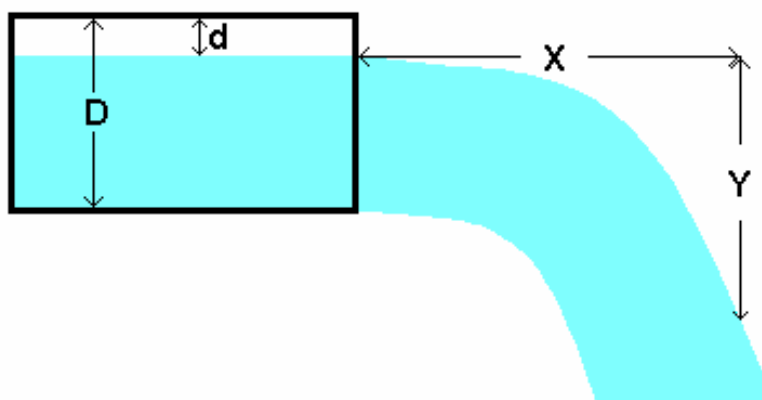
Calcular el caudal que circula por un caño de 10 cm de diámetro completamente lleno, si $X = 32,4$ cm e $Y = 25,5$ cm.

$$Sup = 3,1416 \times \phi^2 / 4 = 3,1416 \times (0,10 \text{ m})^2 / 4 = 0,0078 \text{ m}^2$$

$$V = \sqrt{[g \times X^2 / (2 \times Y)]} = \sqrt{[9,81 \text{ m/seg}^2 \times (0,324 \text{ m})^2 / [2 \times (0,255 \text{ m})]} = 1,421 \text{ m/seg}$$

$$Q = Sup \times Vel = 0,00785 \text{ m}^2 \times 1,421 \text{ m/seg} = 0,0112 \text{ m}^3/\text{seg} = 11,2 \text{ lts/seg}$$

- Para caño parcialmente lleno:



El cálculo se realiza de igual manera que para caño lleno, afectando el resultado con un coeficiente menor que uno, que relaciona la altura sin agua dentro del caño (d) con el diámetro del caño (D):

Tabla N° 1: Factor de corrección para caños parcialmente llenos.

d/D	Factor de corrección	d/D	Factor de Corrección
0,05	0,981	0,55	0,436
0,10	0,948	0,60	0,375
0,15	0,905	0,65	0,312
0,20	0,858	0,70	0,253
0,25	0,805	0,75	0,195
0,30	0,747	0,80	0,142
0,35	0,688	0,85	0,095
0,40	0,627	0,90	0,052
0,45	0,564	0,95	0,019
0,50	0,500	1,00	0,000

En el ejemplo anterior, si $d = 4$ cm, implica que $d/D = 0,04$ m / $0,10$ m = $0,40$.

Con ese valor entramos a la Tabla N° 1 (valores sombreados), obteniendo un coeficiente de $0,627$, siendo el caudal igual a:

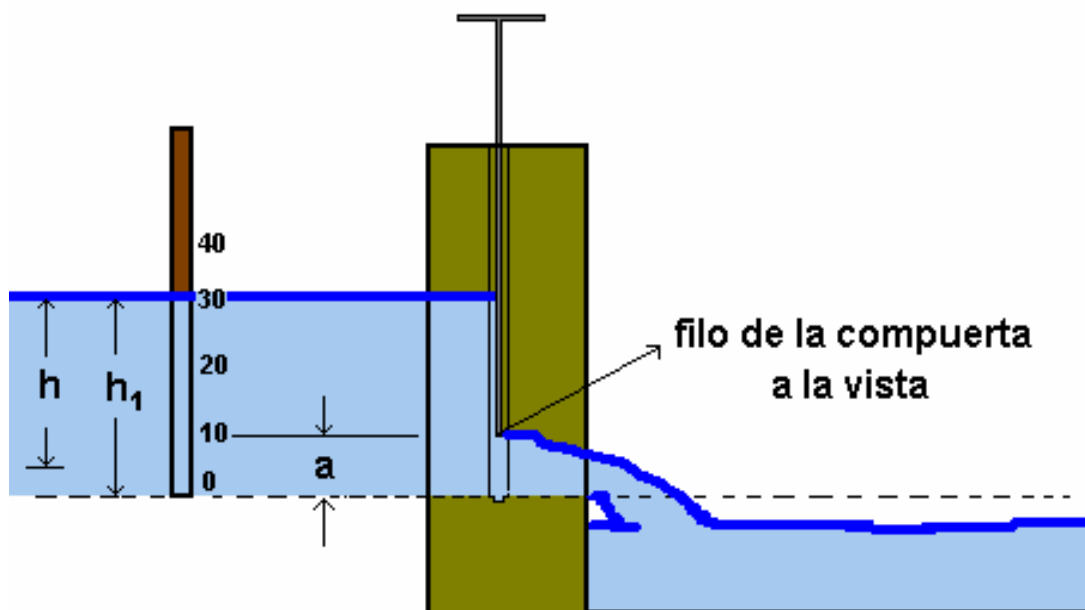
$$Q = 11,2 \text{ lts/seg} \times 0,627 = 7,02 \text{ lts/seg}$$

Aforo utilizando estructuras aforadoras:

El **aforo en compuertas** es un caso particular del aforo por orificios, se practica normalmente cuando se tiene una compuerta de chapa en buen estado de conservación y el nivel hacia aguas arriba de la acequia o canal cubre la parte inferior de la hoja móvil de la misma.

Para aforar una compuerta es necesario saber la velocidad con que el agua pasa a través de ella. Esta velocidad depende de la carga (h) o altura de agua que está actuando sobre la abertura de la compuerta. Para ello debemos conocer si la compuerta trabaja libre o sumergida.

Una compuerta trabaja libre cuando el nivel de la superficie del agua después de ella es inferior al del piso o umbral de la misma:



Compuerta trabajando libre

Si la compuerta trabaja libre se coloca una escala graduada en centímetros, cuyo cero coincida con el umbral de la compuerta (el piso). Esta escala deberá colocarse aguas arriba de la compuerta a una distancia suficiente para que no se afecte la medida de su nivel.

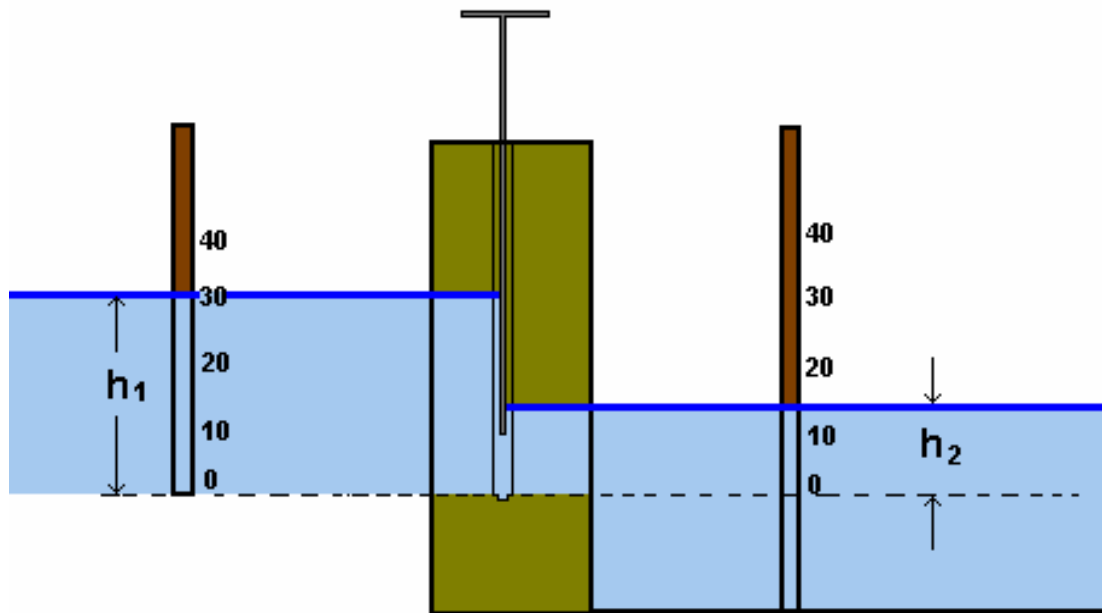
La carga (h) en una compuerta que trabaja libre se calcula restando a la lectura de la escala (h_1) la mitad de la apertura de la compuerta ($a/2$).

Ejemplo:

Calcular la carga en una compuerta libre cuya lectura en la escala aguas arriba de la compuerta es 30 cm y su apertura de 10 cm (ver figura anterior):

$$h = 30 \text{ cm} - (10 \text{ cm} / 2) = 30 \text{ cm} - 5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$$

La compuerta trabaja sumergida cuando el nivel de la superficie del agua después de la compuerta (aguas abajo) se encuentra por encima del nivel superior de la apertura:



Compuerta trabajando sumergida o ahogada

En este caso se debe colocar otra escala después de la compuerta. La carga (h) en este caso se calcula como diferencia entre ambas escalas ($h_1 - h_2$)

Ejemplo:

Calcular la carga en una compuerta sumergida cuyas lecturas en las escalas aguas arriba y aguas abajo de la compuerta son 30 cm y 15 cm, respectivamente (ver figura anterior):

$$h = 30 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = 15 \text{ cm}$$

Una vez conocida la carga se puede estimar la velocidad con que el agua atraviesa la sección de la compuerta con la siguiente fórmula:

$$V = C_x \sqrt{(2 \times g \times h)}$$

donde:

V: velocidad del agua a través de la compuerta (m/s).

C: coeficiente de gasto o contracción.

g: aceleración de la gravedad = 9,81 m/s².

h: carga (m).

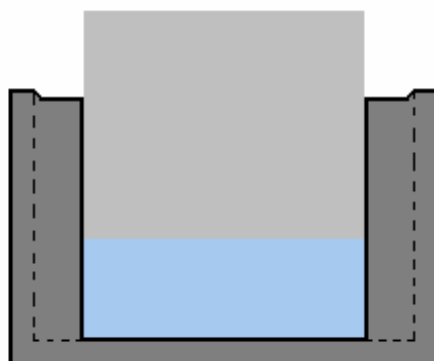
El coeficiente de gasto o contracción (C) varía de acuerdo a la posición y dimensiones de la compuerta respecto a la acequia en la que se encuentra, y de la forma en que ésta funcione (libre o sumergida).

Cuando la compuerta trabaja libre y coincide con la solera (piso) y lados del canal, es decir que tiene la misma sección transversal:



el coeficiente de gasto o contracción es: **C = 0,68**.

Cuando la compuerta trabaja libre y coincide con la solera del canal pero no con los laterales del mismo (la sección de la compuerta ahora es menor):



ahora el coeficiente de gasto es: **C = 0,65**

Cuando la compuerta trabaja sumergida y coincide con la solera y los costados del canal, el coeficiente de gasto es: **C = 0,73**.

Cuando la compuerta trabaja sumergida y coincide con la solera pero no con los costados del canal (sección más pequeña), el coeficiente de gasto es: **C = 0,67**.

Normalmente, cuando se desconoce el coeficiente de gasto o contracción de una compuerta, lo recomendable es determinarlo calibrando la misma para distintos modos de funcionamiento, con un método de aforo confiable, por ejemplo, empleando molinete hidrométrico (que veremos más adelante).

Ejemplo:

Calcular el caudal (Q) que pasa por una compuerta que está 10 cm (a = 0,10 m) abierta, cuyo ancho es de 50 cm (b = 0,50 m), su carga es de 20 cm (h = 0,20 m) y su coeficiente de gasto es C = 0,65:

Como el caudal es igual a velocidad multiplicada por el área, calculamos primero la velocidad del agua pasando a través de la apertura de la compuerta:

$$V = C \times \sqrt{(2 \times g \times h)} = 0,65 \times \sqrt{(2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,20 \text{ m})} = 1,29 \text{ m/s}$$

Ahora calculamos la sección de paso del agua:

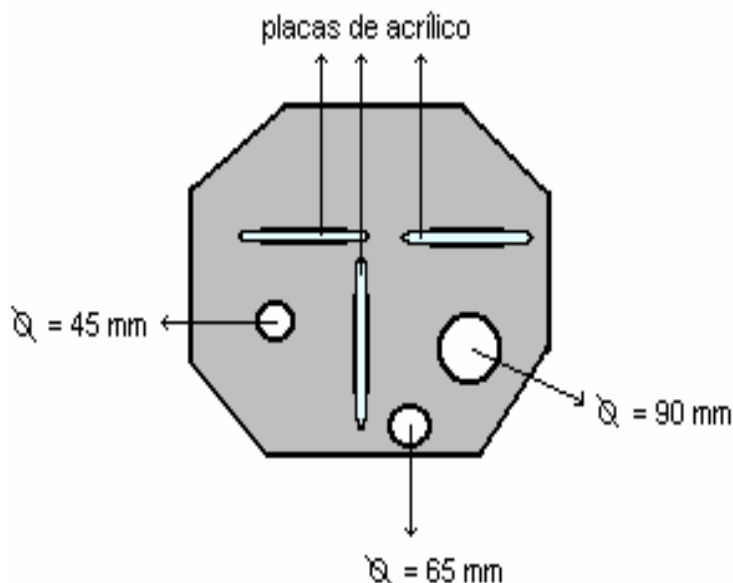
$$S = a \times b = 0,10 \text{ m} \times 0,50 \text{ m} = 0,05 \text{ m}^2$$

Finalmente, el caudal es:

$$Q = V \times S = 1,29 \text{ m/s} \times 0,05 \text{ m}^2 = 0,0645 \text{ m}^3/\text{s} = 64,5 \text{ lts/s}$$

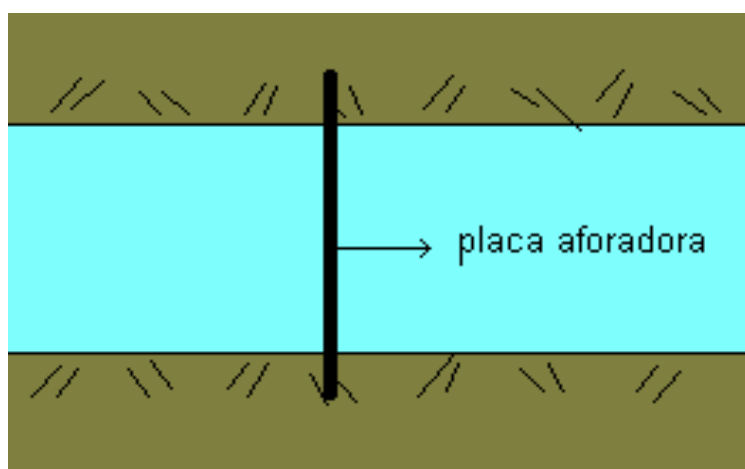
La **placa aforadora** es un dispositivo que ha sido diseñado para aforar el caudal que circula por los surcos de riego (es un elemento portátil de aforo).

Casi siempre es una placa metálica, cuyas dimensiones son de 78,5 cm de ancho por 77,0 cm de alto y de 2 a 3 mm de espesor:



Los orificios deben ser de cortes vivos y bien calibrados, donde las ventanitas de acrílico permiten ver el agua del otro lado.

Supongamos que queremos determinar el caudal de un surco. Se clava la placa normal al surco (a ojo):

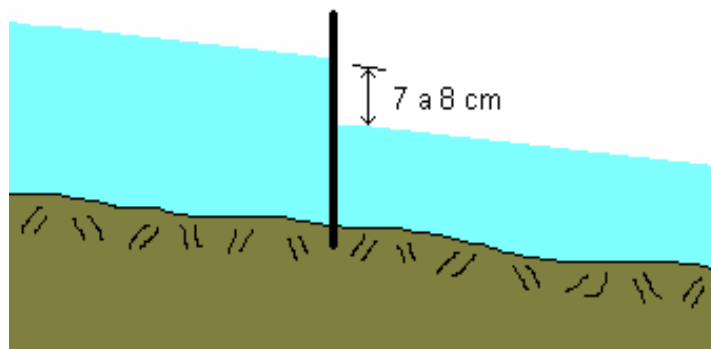


y se la coloca perfectamente nivelada con un nivel como el que utilizan los albañiles.

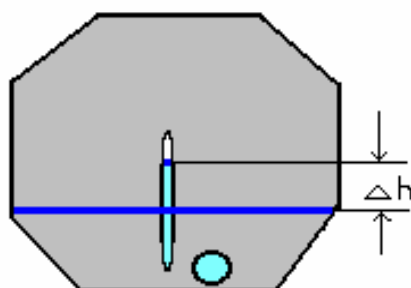
¿Qué puede suceder?

1- Que el orificio sea muy pequeño, implica que el nivel del agua en el surco va a comenzar a subir. La solución es cambiar por un orificio mayor.

2- Que el orificio sea más grande que lo aconsejable. Entonces el equipo pierde precisión porque se da un desnivel pobre entre aguas arriba y aguas abajo, necesitando de 7 a 8 cm de diferencia para que funcione bien:



Una vez que está bien elegido el orificio, después de estabilizarse el desnivel (Δh), se acerca una regla a la placa de acrílico y se lo mide:

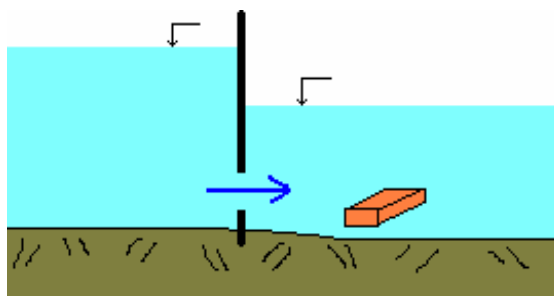


El caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = \mu \times A \times \sqrt{2 \times g \times \Delta h}$$

Donde μ es el coeficiente de gasto del orificio y **A** el área o superficie del mismo.

Existen valores para coeficientes trabajando con carga ahogada y libre, pero son más confiables los primeros. Por ello, si no tengo carga ahogada, provocho el aumento de tirante aguas abajo colocando un ladrillo, por ejemplo:

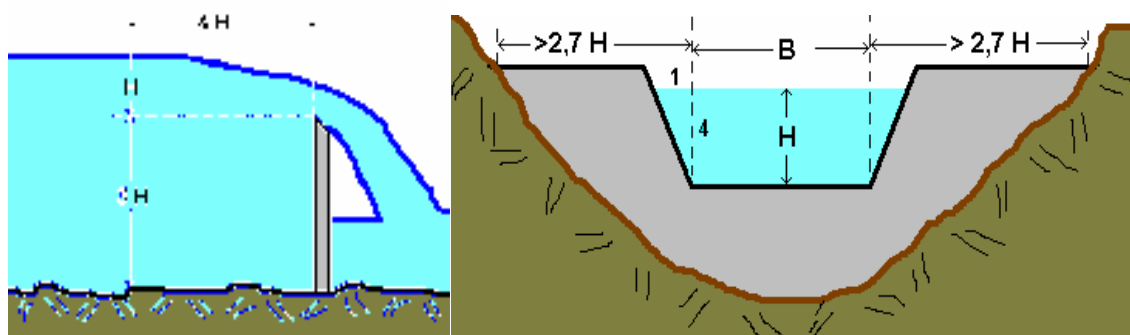


Algunos **valores del coeficiente μ** para descarga libre y ahogada, teniendo en cuenta diámetros de los orificios (expresados en metros):

Diámetro del orificio (ϕ)	Descarga libre	Descarga ahogada
0,020	0,61	0,57
0,025	0,62	0,58
0,035	0,64	0,61
0,045	0,63	0,61
0,050	0,62	0,61
0,075	0,60	0,60

Los vertederos son aparatos de diferentes formas y tamaños utilizados para aforar corrientes de agua. Particularmente, veremos los más utilizados para riego. Son uno de los dispositivos de aforo más estudiados, estando en la actualidad siendo relegados por los aforadores de resalto.

Dentro de los vertederos trapeziales se destaca el vertedero de Cipoletti:



En este caso el talud es : $z = 1 : 4$, mientras que el coeficiente de gasto μ es 0,42 (constante en el aforador Cipoletti, debido a su forma).

En la fórmula general de cálculo de caudal: $Q = \mu \times B \times H \times \sqrt{(2 \times g \times H)}$, implica que reemplazando los anteriores valores nos queda:

$$Q = 1,86 \times B \times \sqrt{H^3}$$

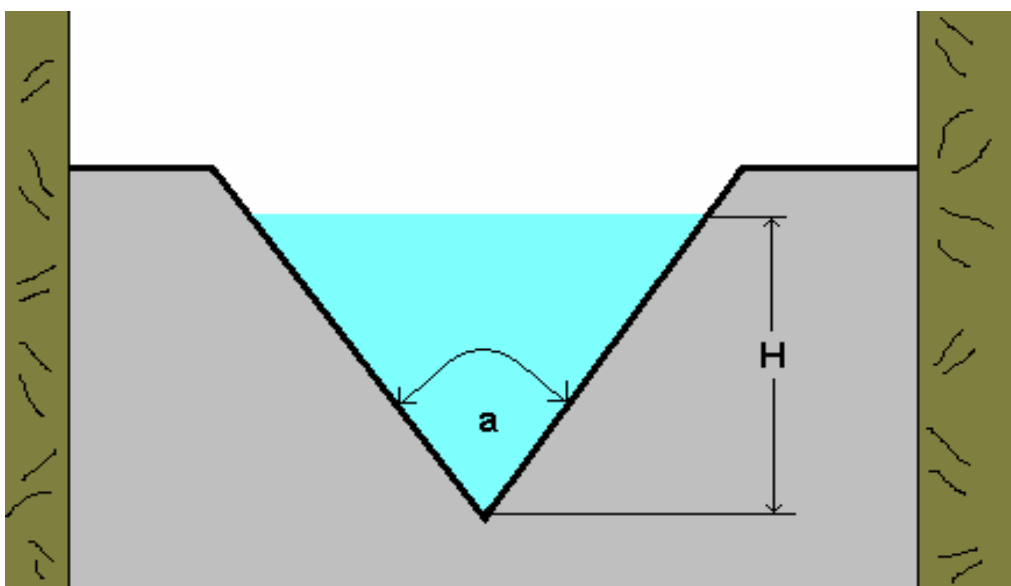
La distancia del borde del canal al pelo de agua en el vertedero debe ser $> 2,7 H$.

Ejemplo:

Calcular el caudal midiendo con un vertedero trapezoidal Cipoletti que posee un umbral (B) de 60 cm, donde el nivel del agua marca 15 cm en la escala:

$$Q = 1,86 \times 0,60 \text{ m} \times \sqrt{0,15^3} = 0,064 \text{ m}^3/\text{s} = 64 \text{ lts/s}$$

Otro caso especial de vertederos es el vertedero triangular, el cual se caracteriza por el ángulo de abertura:



Donde el caudal se calcula con la fórmula:

$$Q = 1,37 \times \text{tg}(a/2) \times H^{2,47}$$

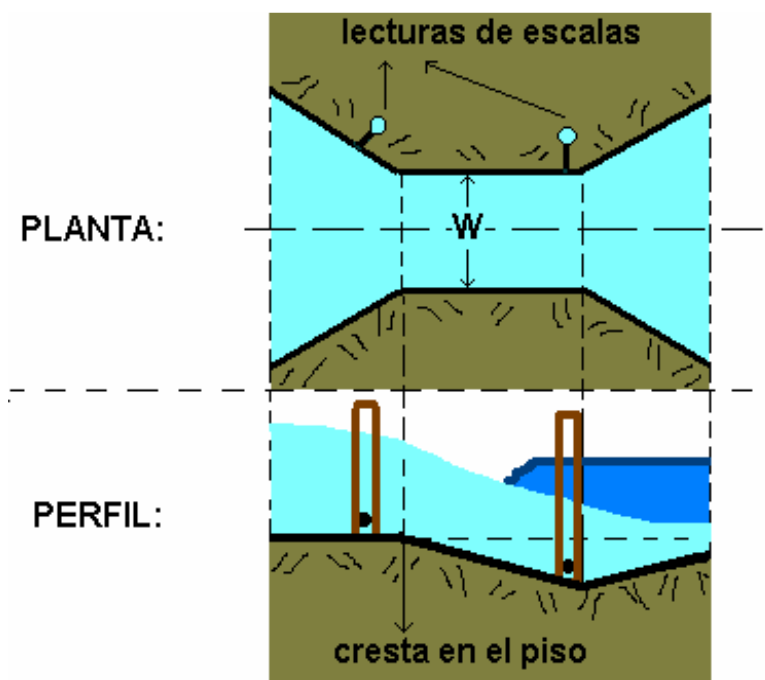
Cuando se decide instalar un vertedero, ya sea de tipo Cipoletti, triangular o cualquier otro tipo, hay que elegir el lugar, para el cual se debe profundizar y ensanchar el canal o acequia aguas arriba del mismo

para que la velocidad de arribo sea menor a 0,50 m/s, logrando la decantación de la sedimentación.

Los vertederos deben trabajar libres, siendo ésta una condición difícil de lograr en llanura, y uno de los condicionamientos fuertes frente a los aforadores de resalto.

La utilización de vertederos permite conocer en forma instantánea el caudal que se quiere medir, ya que tienen tablas (o se las fabrica) donde por cada altura de agua tenemos un caudal (se las suele llamar escalas parlantes).

Dentro de los **aforadores de resalto** uno muy difundido es el aforador Parshall, que no está influenciado por los sedimentos, ni por la velocidad de llegada y no tiene problemas de trabajar ahogado.



Es una canaleta que sigue el principio de Venturi para el aforo del flujo en canales abiertos (donde se provoca la contracción hay mayor velocidad del agua y menor altura de la misma), constituida por tres secciones principales:

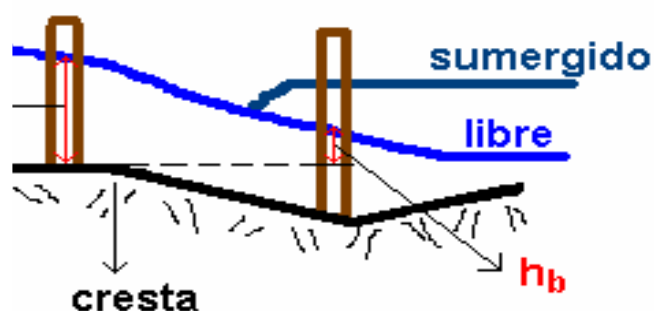
- una sección convergente o de contracción, localizada en su extremo aguas arriba, que conduce a
- una sección contraída o garganta (de ancho W)
- y una última sección divergente o de expansión aguas abajo

siendo sus paredes en los tres casos verticales.

Este tipo de estructuras funciona muy bien tanto para caudales grandes (canales principales) como para acequias, estando las dimensiones estandarizadas por tablas con cada una de sus secciones.

Una ventaja decisiva de la canaleta Parshall consiste en la posibilidad que trabaje con mínima pérdida de carga. Esto hace que se pueda emplear en canales relativamente poco profundos con pendiente escasa (para darse una idea, esta canaleta requiere 4 veces menos diferencia de altura de agua que un vertedero).

Los aforadores Parshall pueden funcionar bajo dos condiciones diferentes de flujo:



- donde no existe sumergencia: flujo libre.
- donde la elevación de la superficie del agua, corriente abajo, tiene altura suficiente para retardar el índice de descarga: flujo sumergido o ahogado.

El índice de sumergencia (S) se obtiene como:

$$S = h_b / h_a$$

Si $S > 0,95$ no sirve.

Si $S < 0,95$ son datos confiables.

W (m)	Descarga libre	Descarga ahogada
$W < 0,30$	$S < 0,60$	$0,6 < S < 0,95$
$0,30 < W < 2,50$	$S < 0,70$	$0,7 < S < 0,95$
$2,50 < W < 15,00$	$S < 0,80$	$0,8 < S < 0,95$

Para determinar el caudal se dispone de dos mediciones de altura de agua (h_a y h_b). Ambas escalas se calibran colocando el cero a la altura de la cresta del aforador.

Si la descarga es libre, basta con medir la altura de la escala o limnómetro aguas arriba (h_a), mientras que si se trabaja con descarga ahogada, se necesita las dos mediciones (h_a y h_b):

$$Q = m \times h_a^n \quad \text{Descarga libre}$$

donde para cada W se tiene un valor de m y de n.

$$Q = m \times h_a^n - C \quad \text{Descarga ahogada}$$

donde C está en función de el ancho W, del índice de sumergencia S y de la altura aguas arriba h_a .

En caso de que se pretenda diseñar un aforador de este tipo hay que consultar a Manuales de Hidráulica.

Se los puede construir de chapa, mampostería, hormigón, etc., donde hay que tener datos de caudales máximos y mínimos. Con esos datos se consulta en las tablas y puede haber varios que cumplan ese rango. Entonces, ¿cúal adoptamos? Hay que tener en cuenta que un aforador más chico:

- se tiene un ahorro en la construcción.
- se produce una mayor pérdida de carga.
- hay un aumento en la velocidad de salida.
- se produce mayor deposición de sedimentos aguas arriba.

Una receta: que W sea $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{4}$ del ancho del canal.

¿Dónde se instala el Parshall?

Como no lo afecta la velocidad de llegada del agua, pero si las ondas (el oleaje), no conviene ponerlo cerca de compuertas o de cualquier otra estructura que perturbe el nivel del agua. Lo mejor es ubicarlo en una parte recta del canal o acequia.

Otro tipo de aforador de resalto es el aforador de cresta ancha. Se basa en la elevación del fondo del canal para conseguir que las líneas o filetes del agua sean paralelas (flujo laminar) y así poder relacionar la altura del agua en el canal con el caudal.

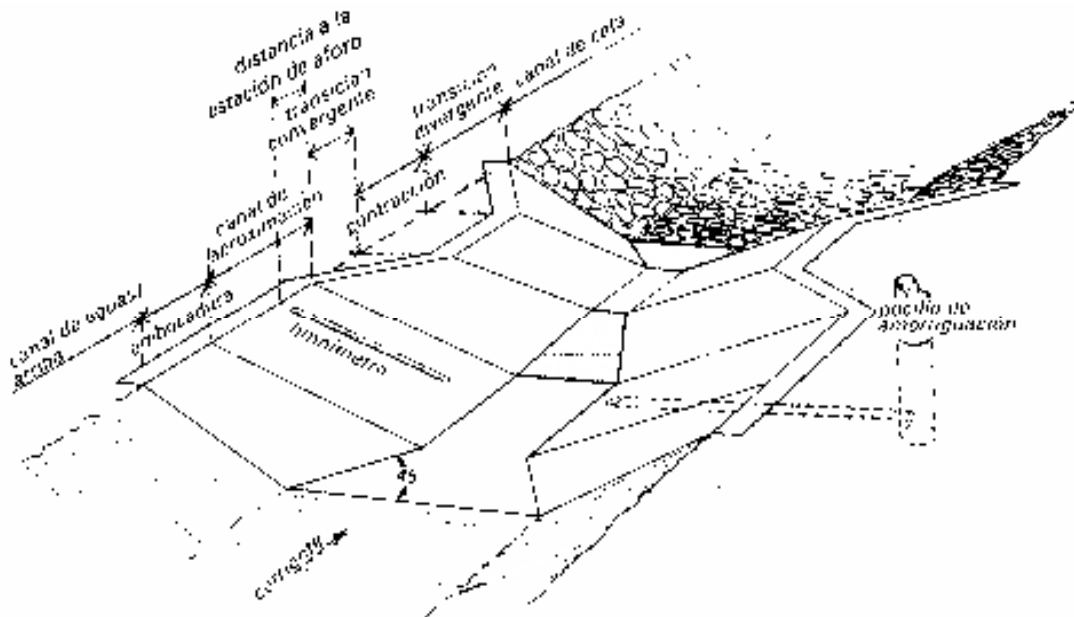
Este tipo de aforador tiene las siguientes ventajas :

- Se puede construir en canales o acequias de cualquier tamaño.
- el error de medición es menor del 2 %.
- Los cuerpos flotantes que puede transportar el agua causan pocos problemas.
- Deja pasar la mayor parte de los sedimentos.
- Los caudales son proporcionales a las dimensiones de la obra.
- Es de construcción económica.
- Y quizás la más importante es que si en la construcción del aforador no se respetaron algunas de las medidas durante su construcción, existen fórmulas hidráulicas que mediante programas computacionales se les introduce los valores de las nuevas medidas y se obtiene la calibración del mismo en gabinete.

Esto último no puede hacerse con los otros aforadores de resalto (Parshall, sin cuello, etc.), ya que en estos hay que respetar a ultranza las medidas originales, pues no existen fórmulas hidráulicas que permitan una nueva calibración con medidas modificadas, ya que han sido obtenidos empíricamente (por prueba y error).

La instalación más sencilla en una acequia de tierra consiste en construir un tramo de acequia de hormigón con fondo a nivel cero y paredes verticales (sección rectangular uniforme) y luego se construye el resalto y la rampa.

Hay que aclarar que este es un caso particular (con paredes verticales) que simplifica mucho los cálculos y construcción en campo, mientras que en el aforador de cresta general se pueden visualizar sus paredes inclinadas:



Aforador de cresta general con paredes inclinadas

Para diseñar un aforador de cresta ancha se debe conocer:

- el ancho de la acequia o canal donde se construirá.
- el caudal máximo que se pretenda medir.

Para conocer el caudal aproximado que circula por una acequia donde se pretende instalar el aforador, una manera rápida es calcular la velocidad media del agua y el área o sección transversal, ya que el caudal (Q) es igual a la Velocidad media multiplicada por el Área (ya visto anteriormente).

Para calcular la velocidad media de la sección (V_{media}) tomamos un tramo de la acequia, por ejemplo unos 10 m (medido con cinta métrica), señalándolo con dos estacas. Se arroja un flotador (trozo de madera o corcho) un poco antes de la primera marca y medimos con un cronómetro el tiempo que tarda en recorrer esos 10 m, supongamos unos 15 segundos.

Dividiendo el espacio (los 10 m) recorrido por el flotador, por el tiempo empleado en recorrerlo, se tiene la velocidad superficial (V_{Sup}):

$$V_{Sup} = 10 \text{ m} / 15 \text{ seg} = 0,67 \text{ m/seg}$$

El agua que se encuentra más cerca de la superficie y en el centro de la acequia se mueve con mayor velocidad que la que se encuentra cerca del piso o las paredes. Por lo tanto, para obtener la velocidad media de la sección hay que afectar a la velocidad superficial por un coeficiente o factor de rugosidad:

$$V_{\text{media}} = V_{\text{Sup}} \times \text{coeficiente}$$

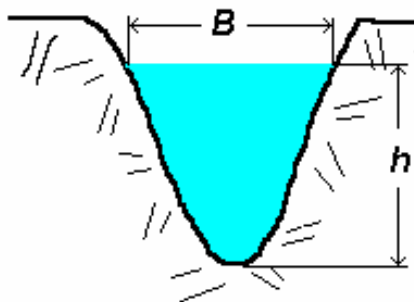
El coeficiente o factor de rugosidad está asociado con el tipo de material de la pared de la acequia, donde se dan algunos valores, entre otros:

Tipo de pared	Factor de rugosidad
Lisa (hormigón liso)	0,82
poco lisa (tierra)	0,77
Rugosa (Tierra y maleza)	0,72

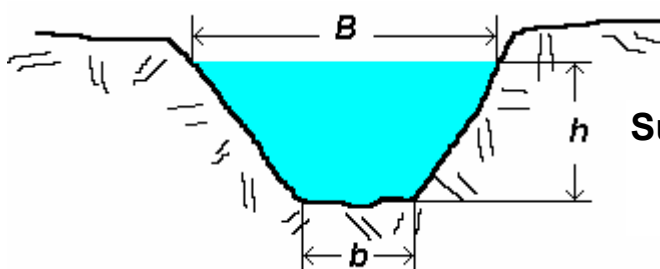
Al ser la acequia de tierra se adopta 0,77, quedando:

$$V_{\text{media}} = V_{\text{sup}} \times \text{factor} = 0,67 \text{ m/seg} \times 0,77 = 0,52 \text{ m/seg}$$

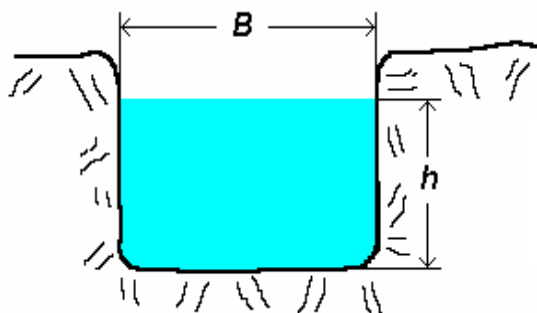
La sección de la acequia se determina según la forma de la misma:



Superficie = $(B \times h) / 2$
(triangular)



Superficie = $(B + b) \times h / 2$
(trapecial)



Superficie = $B \times h$
(rectangular)

Supongamos que en nuestro caso la sección es rectangular, con un ancho de boca (B) promedio de 0,60 m y una profundidad del agua (h) de 0,30 m:

$$\text{Superficie} = B \times h = 0,60 \text{ m} \times 0,30 \text{ m} = 0,18 \text{ m}^2$$

Ahora podemos calcular el caudal:

$$Q = V_{\text{media}} \times \text{Superficie} = 0,52 \text{ m/seg} \times 0,18 \text{ m}^2 = 0,094 \text{ m}^3/\text{seg} = 94 \text{ lts/seg}$$

Habiéndose obtenido los dos datos necesarios para construir el aforador de cresta ancha:

- ancho de la acequia: 0,60 m.
- caudal de la acequia: 94 lts/seg.

Para elegir el lugar adonde se lo debe emplazar hay que tener en cuenta que debe haber un tramo recto aguas arriba del aforador de un largo 10 veces mayor que el ancho de la acequia. Por ejemplo, en este caso: $0,60 \text{ m} \times 10 = 6,00 \text{ m}$.

En ese tramo, la acequia debe tener un ancho más o menos uniforme y una pendiente no menor a 1‰ (1 m de desnivel en 1.000 m de largo).

Con el ancho de la acequia (0,60 m), se entra a la **Tabla N° 2**:

DATOS PARA LA CONSTRUCCION DE UN AFORADOR DE CRESTA ANCHA

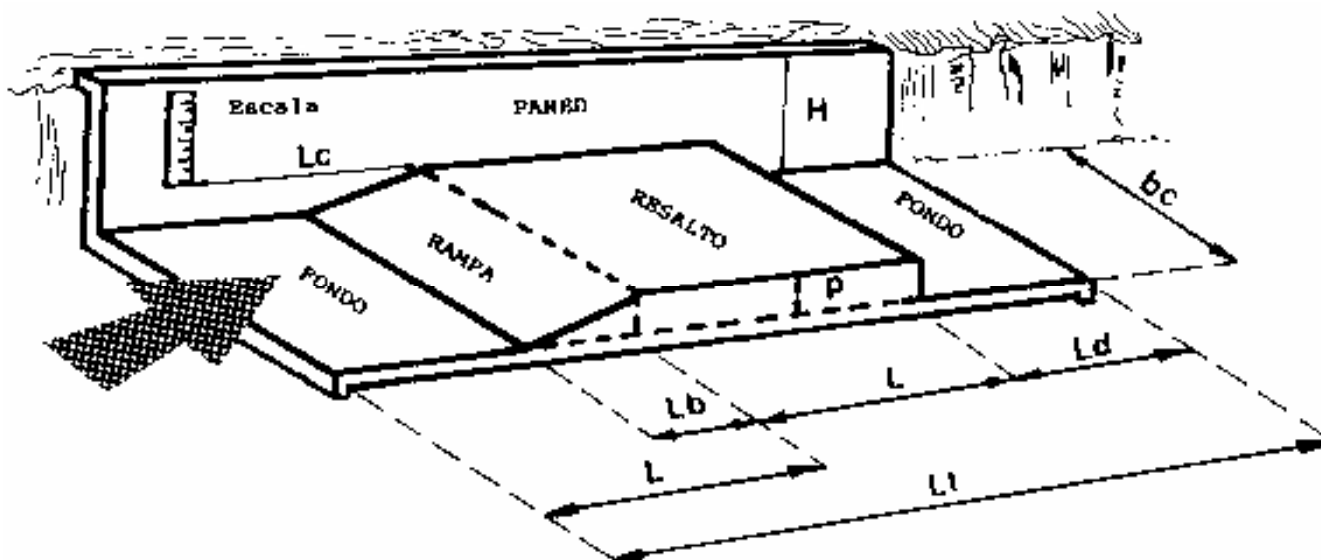
TAMANO	ANCHO ACEQUIA metros (de)	CAUDAL A MEDIR litros/seg (Q)		TRAMO		RESALTO			RAMPA LARGO metros (Lb)	ESCALA DISTANCIA AL RESALTO metros (Lo)	MATERIALES DE CONSTRUCCION	
		Nro	Mts	LARGO metros (L)	ALTURA metros (H)	TAMANO		UBICACION				
						ALTO (P)	LARGO (L)	COMIENZO (L)				FINAL (Ld)
A	0,30	3	174	1,80	0,50	0,10	0,50	0,80	0,30	0,70	Hormigon simple 1:1 cemento x 5 aplo sin hierro) 8-10 cm de espesor	
	0,40	5	150									
	0,50	6	190									
B	0,50	9	219	2,05	0,50	0,10	0,75	0,80	0,30	0,70	Pavilla de hierro 4,2 mm, cruzado cada 15 cm. Hormigon simple 10-12 cm de espesor.	
	0,60	11	263									
	0,70	13	306									
	0,80	15	350									
	0,90	17	384									
	1,00	19	438									
C	0,50	9	344	2,35	0,80	0,20	0,75	1,00	0,40	0,90	Pavilla de hierro 6mm, cruzado cada 15 cm. Hormigon simple 10-12 cm de espesor	
	0,60	11	413									
	0,70	13	482									
	0,80	15	551									
	0,90	17	620									
	1,00	19	689									
D	1,00	30	1110	3,00	1,00	0,20	1,00	1,40	0,40	1,35	Pavilla de hierro 6mm, cruzado cada 15 cm. Hormigon simple 10-12 cm de espesor	
	1,10	33	1221									
	1,20	36	1332									
	1,30	39	1443									
	1,40	42	1554									
	1,50	45	1665									

Publicación preparada con datos provenientes del trabajo "Flow measuring flumes for open channel systems" 1986 M.G. Bos, J.A. Rappaport and A.J. Clemmens.
Publicación 36, John Wiley y Sons (Ed.), Wageningen, The Netherlands.

y se observa que para ese ancho existen dos posibilidades de tamaño: B y C, trabajando el primero en un rango de caudales de 11 a 263 lts/seg, mientras que el segundo trabaja entre 11 y 413lts/seg.

La elección del tamaño dependerá del caudal máximo que circule por la acequia (hay que estimarlo).

Una vez hecha la elección del tamaño, en la misma tabla anterior (Tabla N° 2) se obtiene cada una de las medidas que acá se grafican:

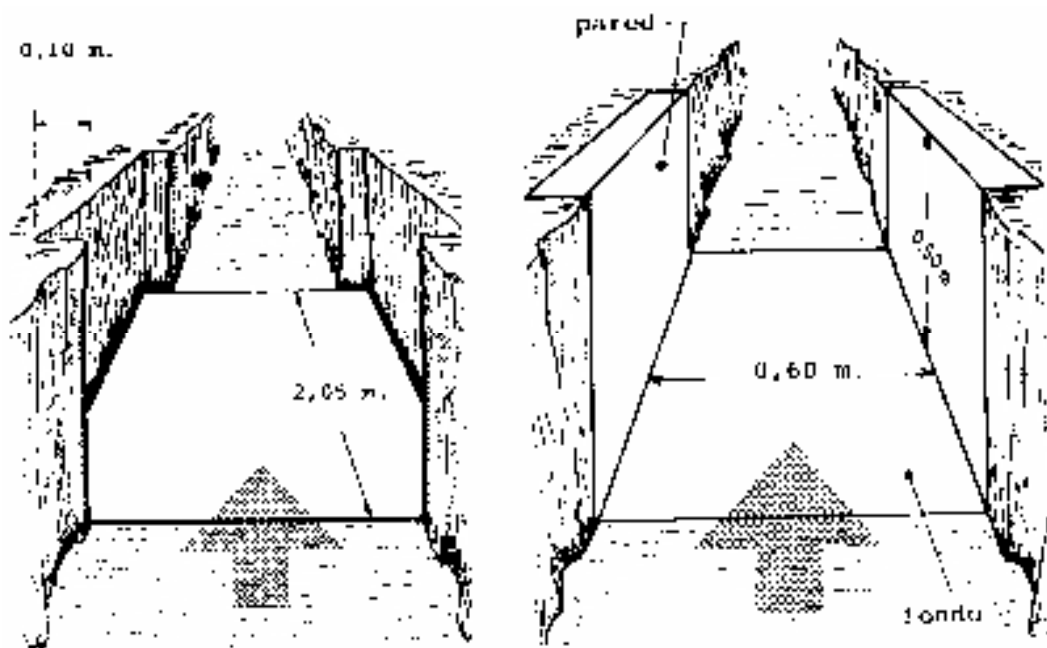


Aforador de cresta ancha

Una vez elegido el lugar para hacerlo, lo que primero se hace es construir un tramo de la acequia en hormigón, con el fondo a nivel cero y las paredes verticales, de manera de tener una sección rectangular uniforme.

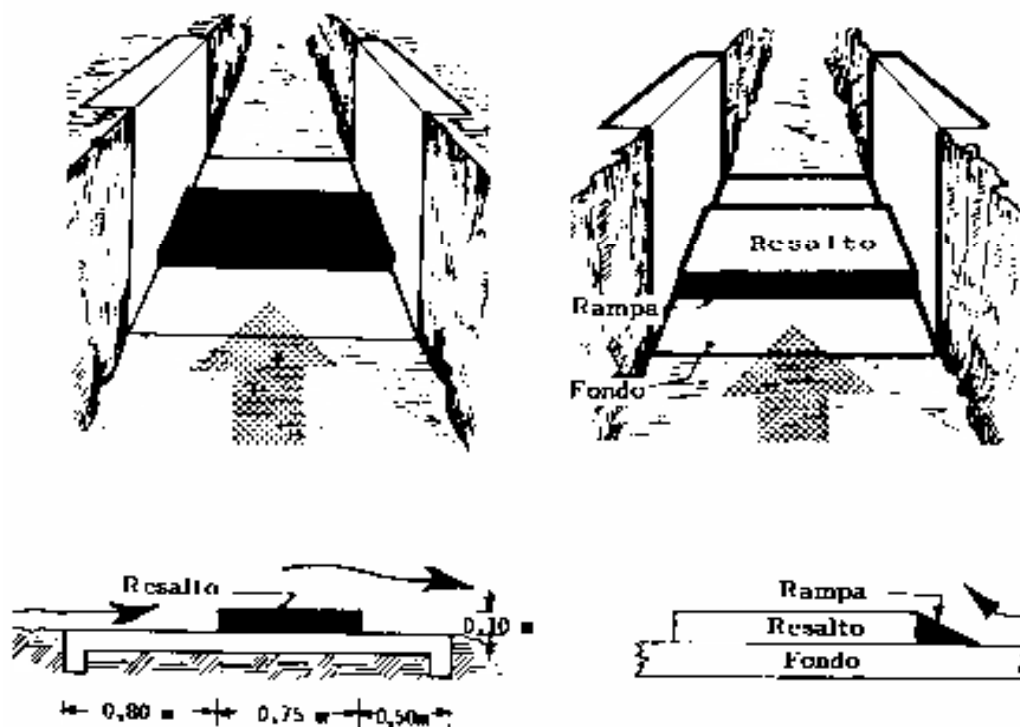
El ancho debe ser algo mayor que el de la acequia, para que una vez construidas las paredes, tenga el ancho buscado.

Si tenemos en cuenta el ejemplo anterior, para una acequia de 0,60 m de ancho y $Q = 94$ lts/seg, se adopta de la Tabla anterior el tamaño B, implica que el largo (L_t) es 2,05 m y la altura (H) es de 0,50 m:



Tanto el fondo como las paredes deben tener una terminación perfectamente lisa.

Para construir el resalto, con las dimensiones obtenidas de Tabla: $P = 0,10$ m de alto, y $L = 0,75$ m de largo, el escalón o resalto debe estar ubicado a $0,80$ m del comienzo del tramo rectangular (L_a), y a $0,50$ m del final del mismo (L_d):



La parte superior del resalto debe tener nivel cero en todos los sentidos.

Una vez que ha fraguado el resalto se construye la rampa, con el largo de 0,30 m (Lb). Aquí también la terminación del resalto y la rampa debe ser perfectamente lisa.

Una vez que se ha construido el aforador hay que colocar la escala hidrométrica que indique el caudal que circula para cada altura de agua.

Para la instalación de la escala de caudales se utiliza la **Tabla N° 3:**

CAUDALES EN LITROS/SEGUNDO POR METRO DE ANCHO DEL AFORADOR Y POR CADA CENTIMETRO DE AGUA DE LA ESCALA

AL TURA DE AGUA EN LA ESCALA EN CM	TAMBIÉN				AL TURA DE AGUA EN LA ESCALA EN CM	TAMBIÉN			
	A	B	C	D		A	B	C	D
4	13	-	-	-	36	-	438	405	405
5	19	19	18	-	37	-	-	423	423
6	25	25	24	-	38	-	-	442	442
7	32	32	31	-	39	-	-	462	461
8	39	39	38	37	40	-	-	480	480
9	48	47	45	45	41	-	-	500	500
10	56	55	54	53	42	-	-	520	520
11	65	65	62	62	43	-	-	540	540
12	75	74	71	71	44	-	-	560	561
13	85	84	81	80	45	-	-	591	581
14	96	95	91	90	46	-	-	622	622
15	107	106	101	100	47	-	-	653	654
16	118	118	112	111	48	-	-	685	685
17	130	130	123	122	49	-	-	697	697
18	143	142	134	134	50	-	-	689	690
19	155	155	146	146	51	-	-	-	712
20	169	169	159	158	52	-	-	-	735
21	183	182	171	171	53	-	-	-	758
22	197	197	185	184	54	-	-	-	781
23	212	211	198	198	55	-	-	-	805
24	227	226	212	212	56	-	-	-	829
25	242	242	226	226	57	-	-	-	853
26	259	258	241	240	58	-	-	-	877
27	275	274	256	256	59	-	-	-	902
28	292	291	271	271	60	-	-	-	927
29	309	308	287	286	61	-	-	-	953
30	326	325	302	302	62	-	-	-	978
31	344	343	319	319	63	-	-	-	1004
32	362	361	336	336	64	-	-	-	1030
33	381	380	352	352	65	-	-	-	1056
34	-	399	370	370	66	-	-	-	1083
35	-	418	387	387	67	-	-	-	1110

en donde se indican para cada altura de agua el caudal en lts/seg para los distintos tipos de aforadores de cresta ancha.

Es importante tener presente que esos caudales están expresados para 1 m de ancho del aforador, de manera tal que a los valores de la tabla hay que multiplicarlos por el ancho del mismo, cuando éste no es igual a uno.

Para nuestro ejemplo anterior, para un ancho de 0,60 m y un tamaño B, los datos de caudales indicados en esta tabla se deben multiplicar por 0,60 para tener los datos reales de caudal para cada altura. Por ejemplo, para 5 cm de altura de agua corresponde 19 lts/seg por m de ancho del aforador, implica que para nuestro aforador de 0,60 m de ancho corresponde $19 \text{ lts/seg} \times 0,60 \text{ m} = 11,4 \text{ lts/seg}$.

De la misma manera, se hace lo mismo con las otras alturas de agua elaborando una nueva Tabla de caudales de nuestro aforador.

Con esos últimos valores se construye una escala de madera, chapa, acrílico o directamente pintada sobre el hormigón, donde se indiquen directamente los caudales en lts/seg para cada centímetro de agua.

¿Dónde se instala la escala?

Se busca el valor de la primera tabla, que para nuestro ejemplo es de 0,70 m (Lc), cuyo cero debe estar al mismo nivel del resalto.

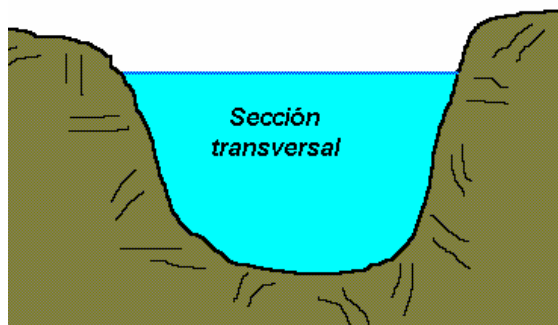
Aforos por sección y velocidad:

Se determina la sección (S) y la velocidad del área (V) donde se afora (concepto ya visto anteriormente). La sección por medio de sondeos y la velocidad por flotadores o molinetes, donde se utiliza la fórmula general:

$$Q = S \times V$$

Esto permite el aforo de cursos de agua de variada magnitud: ríos, arroyos, canales, etc., donde para determinar la sección transversal de

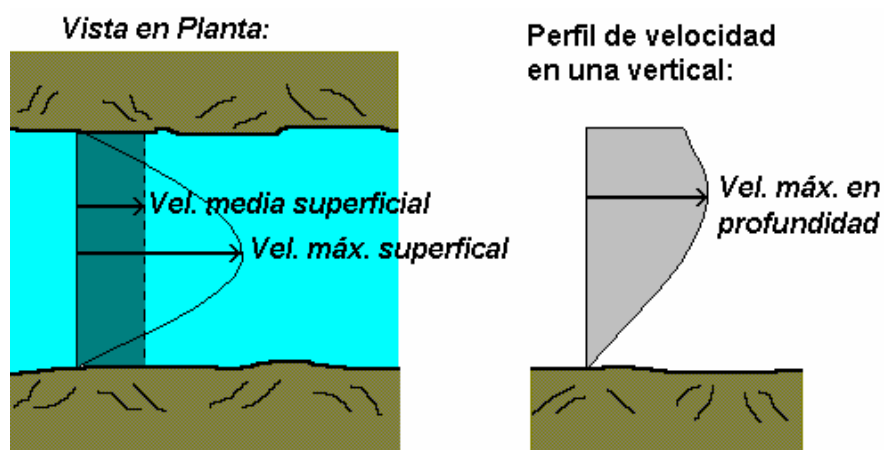
la corriente se debe demarcar sus límites: contorno del cauce y su parte superior por la superficie del agua:



La determinación de la velocidad se realiza en la misma sección transversal, cuando se trabaja con molinete hidrométrico, o puede hallarse en un tramo determinado del curso de agua, cuando se trabaja con flotadores. En este caso (de los flotadores) hay que relevar varias secciones transversales para poder determinar la sección transversal media.

Es de suma importancia para el hidrometrista conocer la distribución de las velocidades en la sección de aforo, cuya distribución no es uniforme.

Normalmente, va aumentando de las orillas hacia el centro, y en una misma vertical va creciendo a partir de la superficie hacia abajo hasta alrededor de 0,2 (20 %) de la profundidad, para luego ir decreciendo hasta el fondo:



El punto de máxima velocidad se encuentra generalmente en las proximidades del centro del cauce y a 0,2 de la profundidad.

Si se unen todos los puntos de igual velocidad se obtienen las curvas isotaqueas:



que permiten planificar los trabajos de relevamiento de campo con mayor precisión.

Aforos con flotadores:

Es un método muy utilizado en determinaciones expeditivas. Es sencillo y prácticamente no requiere equipo especial alguno.

Es preciso tener en claro que se debe realizar aforos con flotadores:

- En aquellos casos en que por circunstancias imprevistas sea imposible realizar el aforo por métodos más confiables.
- Cuando es posible utilizar los datos en forma aproximada.
- Cuando la premura impide hacer el aforo por otro método (caso de una onda de crecida, por ejemplo).

El tramo donde se va a realizar el aforo debe ser lo más recto y uniforme posible, libre de cualquier obstáculo que pueda frenar a los flotadores (ramas de árboles, vegetación acuática, etc.), y cuya longitud sea no menor a seis veces el ancho del cauce.

Al ser este un caso especial en que para la determinación de la velocidad del agua se trabaja en un cierto tramo del curso, no específicamente en una sección, hay que tomar como sección de escurrimiento la media del tramo.

Hay que delimitar claramente la sección de entrada y la de salida, con la longitud que las separa.

La velocidad media del tramo se determinará de acuerdo al tipo de flotador usado: superficiales o sumergidos.

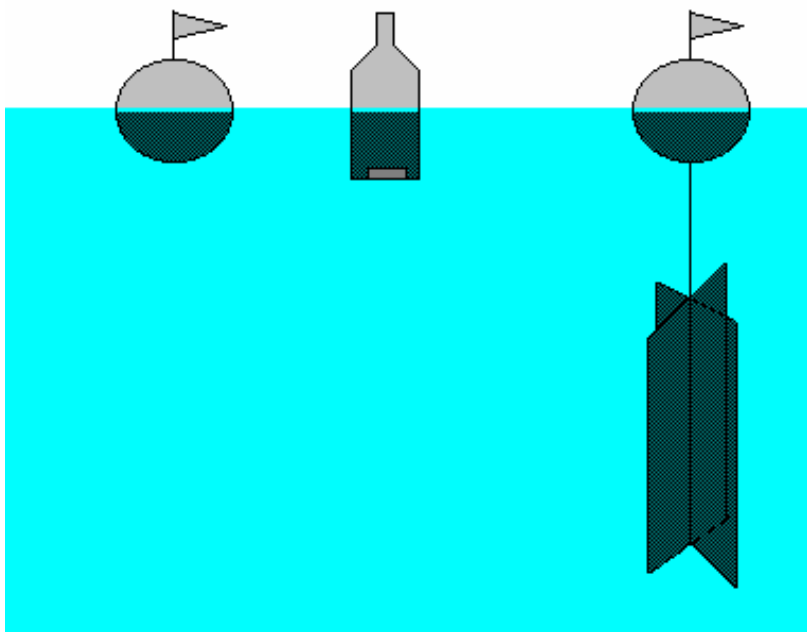
Los flotadores superficiales dan directamente la velocidad superficial, que para transformarla en velocidad media de la vertical hay que afectarla por un coeficiente:

$$V_{\text{media vertical}} = 0,85 \times V_{\text{media superficial}}$$

esto hay que corroborarlo, ya que no siempre es constante ese coeficiente (varía entre 0,80 y 0,95).

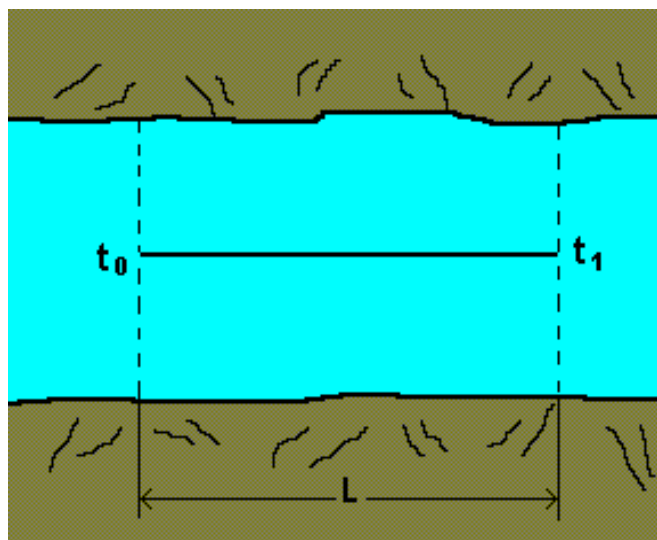
El flotador puede ser una simple madera o una botella lastrada, teniendo el inconveniente de que cuando hay viento durante las mediciones, éstas pueden verse afectadas, por ello la mayor parte del flotador debe estar hundida.

En el caso de los flotadores sumergidos, compuestos por un flotador superficial unido a una pantalla, de tal manera que la misma ofrezca una resistencia uniforme a la corriente horizontal del agua, o también pueden ser listones de maderas lastradas, no deben afectarse por el coeficiente anterior, pues ya lo llevan implícito. Éstos andan muy bien en canales o cauces uniformes, no para superficies de fondo irregulares donde los flotadores pueden trancarse:



Un método sumamente expeditivo consiste en arrojar a un curso de agua flotadores superficiales y tomar el tiempo que tardan en recorrer la longitud L que existe entre las dos secciones de paso anteriormente determinadas.

Para ello se arrojan las botellas lastradas unos 5 a 10 m aguas arriba de la sección inicial. Cuando el flotador pasa por esa sección inicial se pone en marcha el cronómetro ($t_0 = 0$), parándolo cuando pasa por la sección final (t_1):



La botella que demora menos tiempo se la toma para el cálculo de la velocidad máxima superficial:

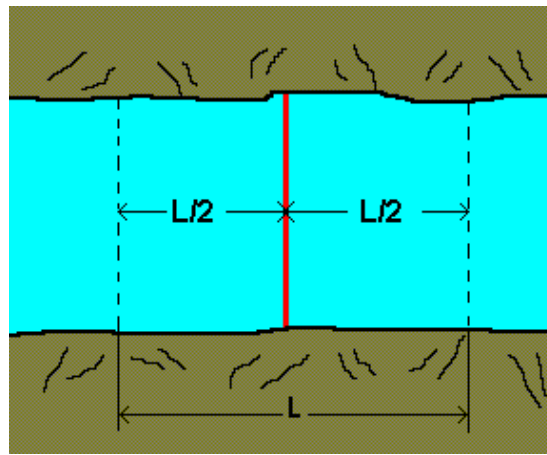
$$V_{\text{máxima superficial}} = L / t_1$$

Luego se transforma a la velocidad máxima superficial en velocidad media de la sección a través de un coeficiente:

$$V_{\text{media sección}} = \text{coeficiente} \times V_{\text{máxima superficial}}$$

Este coeficiente no es muy estable, tomando valores desde 0,55 a 0,90, por lo cual periódicamente se lo debe corroborar con métodos más precisos.

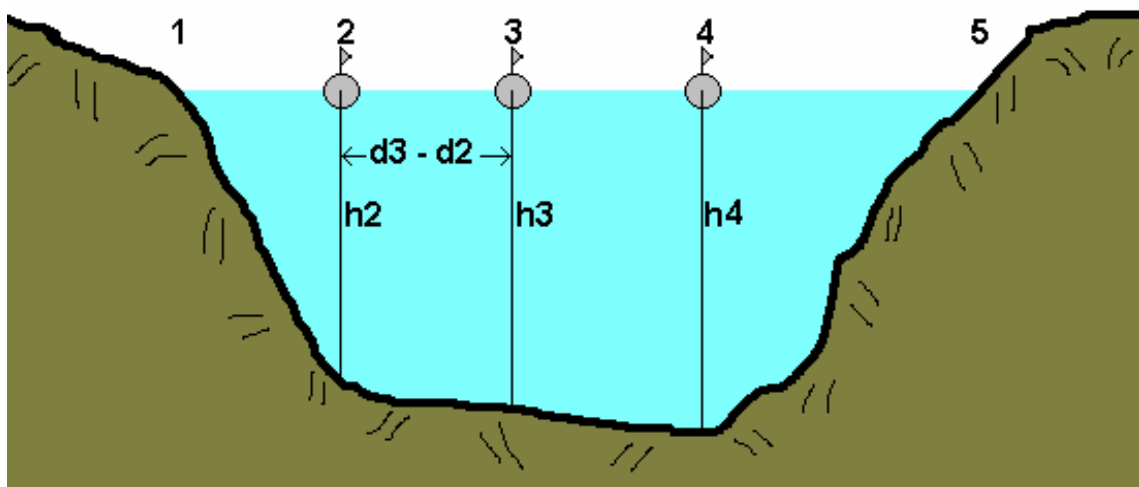
Se asume como sección media a la que se encuentra a la mitad de L:



Quedando:

$$Q = c_{fte.} \times V_{\text{máxima superficial}} \times \text{Sección media}$$

Si el curso de agua tiene un ancho considerable, o se requiere mayor precisión, se trabajará con más de un flotador:



En este caso particular, supongamos que trabajaremos con 3 flotadores.

El mismo trabajo que se hizo para el método expeditivo se realiza aquí, pero ahora se particiona la sección transversal en cuatro secciones más pequeñas, para tener mayor precisión.

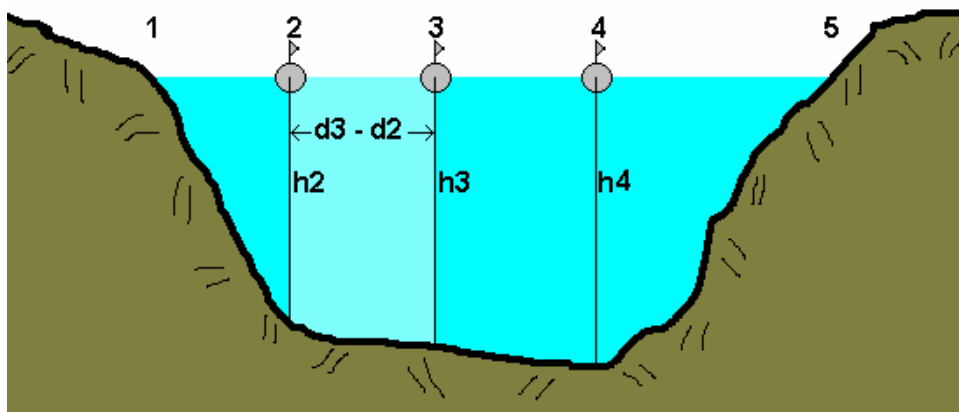
Se medirá cada una de las distancias horizontales:

d2: comprendida entre la orilla (1) y el primer flotador.
 d3: comprendida entre la orilla (1) y el segundo flotador.
 d4: comprendida entre la orilla (1) y el tercer flotador.
 d5: comprendida entre la orilla (1) y la orilla (5), que es el ancho del cauce.

con sus respectivas profundidades (h2, h3 y h4) para cada uno de los flotadores.

El cálculo del caudal consiste ir haciéndolo en cada una de estas divisiones de la sección total, y por último sumar cada uno de estos valores.

Por ejemplo, para calcular el caudal que pasa entre el primer y segundo aforador (2 y 3), que llamaremos Q_{2-3} se calcula:



La velocidad media entre esos dos flotadores es:

$$V_{\text{media 2-3}} = (V_{\text{media vertical 2}} + V_{\text{media vertical 3}}) / 2$$

La sección entre esos dos flotadores es:

$$S_{2-3} = (d3 - d2) \times (h2 + h3) / 2$$

Por lo tanto, el caudal que pasa entre 2 y 3 es:

$$Q_{2-3} = V_{\text{media 2-3}} \times S_{2-3}$$

De igual manera se trabaja en las otras divisiones, siendo un caso especial las orillas (1 y 5) donde se trabaja exactamente igual asumiendo que:

$$d1 = 0$$

$$h1 = 0$$

$$V_{\text{media vertical 1}} = 0$$

$$h5 = 0$$

$$V_{\text{media vertical 5}} = 0$$

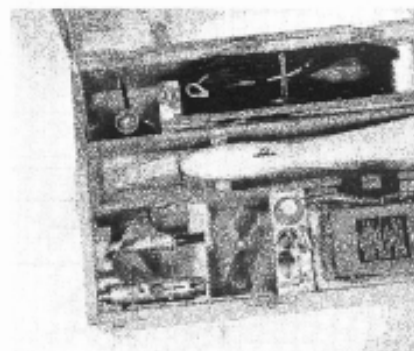
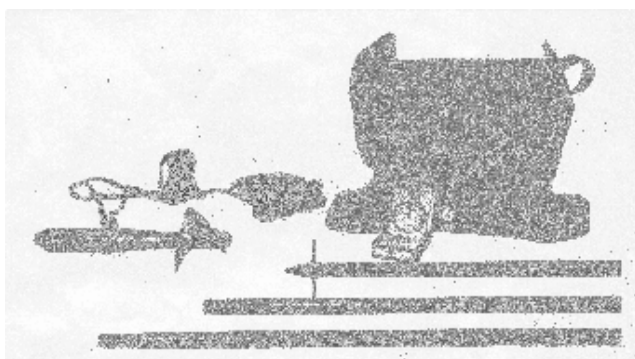
Aforos con molinete hidrométrico:

Este método, como el de flotadores, se fundamenta en la expresión $Q = S \times V$, pero en este caso la velocidad se puede determinar en distintos puntos trabajando sobre la misma sección transversal S con un aparato que se denomina molinete hidrométrico.

Este es un equipo que contabiliza las revoluciones que efectúa la hélice al ser sumergida en una corriente de agua. La velocidad se obtiene mediante una curva de calibración que relaciona las revoluciones por segundo con la velocidad. Esta curva de calibración es única para cada aparato y para cada hélice.

Básicamente están compuestos por:

- Un sistema accionante: hélice o rotor.
- Un interruptor: mecánico o magnético.
- Un sistema de señal: acústico/sonoro o eléctrico digital.
- Un sistema de sujeción: barras o cable y contrapeso.



Distintas partes del equipo de aforo transportado con mochila o con caja de madera

Los molinetes comunes de trabajo en nuestra zona son de hélice, con eje horizontal, cuyo contacto puede ser mecánico o magnético.

Acusan el número de revoluciones por impulsos eléctricos manejados por un interruptor, que es accionado por la hélice.

Se denomina contacto mecánico cuando el interruptor es accionado directamente, o sea que es necesario un contacto físico. Normalmente es un platino preparado para que después de 10 o 20 vueltas de la hélice se cierre y active el circuito eléctrico.

En el caso del contacto magnético, el cierre del circuito eléctrico es efectuado por el pasaje de un imán solidario al núcleo de la hélice (por cada vuelta de la hélice da uno o dos impulsos eléctricos).

La ventaja que tiene este último sistema es que al estar el interruptor en un compartimento estanco no requiere mantenimiento, y al no tener contacto físico, no tiene influencia de roce (frenado) ante las bajas velocidades de la corriente de agua.

El sistema de señal acústico luminoso fue el primer sistema adoptado, teniendo que calibrar hélices con distinto paso para un mismo aparato, debido a que para velocidades más altas resulta imposible determinar el número de señales luminosas o acústicas.

En el sistema digital por cada vuelta de la hélice se generan 1 o 2 impulsos eléctricos que acciona un contador digital eléctrico. Este equipo tiene un interruptor y puesta a cero.

Una vez que el molinete se halla en el lugar de medición, trabaja de la siguiente manera:

- Se pone en cero el contador.
- Se conecta el contador, y en ese instante se inicia la cuenta del tiempo.
- Cuando se cumple el tiempo prefijado de medición se acciona el interruptor y se lee el número de vueltas de la hélice.

Existen equipos digitales equipados con selector de tiempo, de tal manera que uno prefija el tiempo, pone a medir y automáticamente visualiza el número de revoluciones para ese tiempo prefijado.

De acuerdo a su tamaño, los más difundidos son el molinete universal (hélice de 12 cm de diámetro) y el micromolinete (hélice de 3 cm de diámetro), cuya diferencia de tamaño fundamentalmente viene dada por el tamaño del área de aforo y la precisión requerida. En una acequia o canal secundario es más práctico y preciso el micromolinete, mientras que en canales principales y ríos se usa el molinete universal.

El sistema de sujeción del aparato dentro del agua puede ser por:

- Barras.
- Cable y contrapeso.

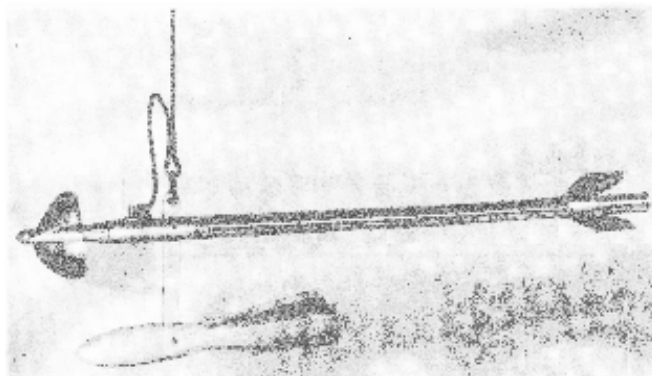
Las barras están compuestas por tramos de 1 m de longitud, graduadas cada cm, o cada 10 cm (según se pida al fabricante), normalmente son de acero inoxidable o de aluminio, que unidas con tornillos o roscadas, permiten trabajar con hasta 4 ó 5 tramos (4 a 5 m):



Molinete hidrométrico sujeto con barras provistas de planchuela de fondo

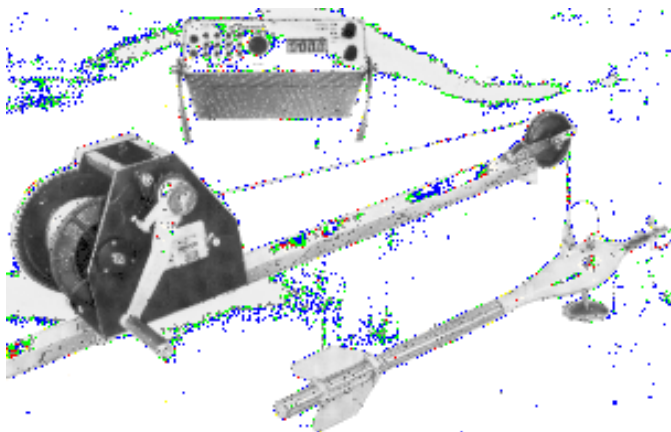
En la parte superior suele venir con el equipo un índice de dirección que se lo alinea con el molinete, para que cuando éste trabaje en profundidad con aguas turbias, permita ubicarlo en la posición correcta (paralelo a los filetes líquidos). Mientras que en la parte inferior se le coloca una planchuela roscada que hace que no se hunda fácilmente en el barro o en el fondo del cauce poco estable.

El cable y contrapeso se utiliza cuando se dificulta el trabajo con las barras, ya sea por la profundidad o por elevada velocidad del agua. Para ello se lo complementa con una barra de cola estabilizadora que la misma corriente del agua hace que el molinete se mantenga paralelo a los filetes líquidos. En este caso el contrapeso es de 5 a 10 kg:



Molinete suspendido por cable, con cola direccional y contrapeso de 5 Kg

El torno y botalón se utilizan en corrientes profundas y/o rápidas, donde el sistema de barra no puede ser utilizado y se necesita más contrapeso (25, 50 y 100 kg). Se complementa con un contacto de fondo, que permite conocer exactamente cuando el aparato llega a la máxima profundidad en cada vertical medida:



Molinete accionado con torno y botalón, el contrapeso forma parte del cuerpo del molinete, posee contacto de fondo y cola direccional.

Está compuesto por un tambor de cable accionado por una manivela de seguridad (autofrenado). La profundidad a que se encuentra el molinete se determina mediante un contador digital con puesta a cero.

La curva de calibración relaciona las vueltas de la hélice (revoluciones) con la velocidad de la corriente.

Viene para cada molinete en particular, y a su vez, para cada hélice del equipo.

La puede suministrar el fabricante (solicitándola, lo cual significa un costo adicional), o si no, se compra el equipo y uno particularmente puede hacerlo calibrar en la Universidad de San Juan, en el Laboratorio de Hidrología de La Plata, o en cualquier otro Centro de Estudios específico en el tema.

Generalmente, cada molinete para cada hélice tiene 2 rectas de calibración de la forma:

$$V = a \times m + b$$

donde:

a: es muy parecido al paso de la hélice.

m: es la relación entre el número de revoluciones (n) y el tiempo de lectura.

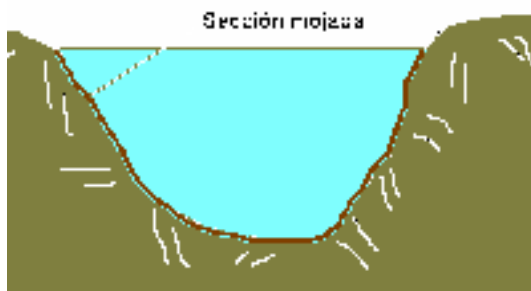
b: velocidad mínima a la que comienza a moverse la hélice.

Por ejemplo, un caso particular de un molinete para una hélice dada, puede tener estos valores:

$$\begin{array}{ll} \text{para } m < 1,74 & \text{es } V = 24,73 \times m + 1,23 \quad [\text{cm/seg}] \\ \text{para } m > 1,74 & \text{es } V = 25,68 \times m - 0,42 \quad [\text{cm/seg}] \end{array}$$

Tareas preliminares de un aforo con molinete hidrométrico:

- La sección mojada se determina midiendo las profundidades y progresivas de cada una de las verticales:



- La velocidad se mide con el molinete en cada vertical elegida a la profundidad deseada.
- El tiempo de medición en cada punto hay que elegirlo teniendo en cuenta el curso de agua que se quiera aforar: si es una sección uniforme (normalmente canales) donde los filetes líquidos vengán “prolijos” (sin remolinos), el intervalo de tiempo (Δt) va a ser distinto que en un río donde tenga algunas verticales con perturbaciones (remolinos), donde voy a tener aceleración y desaceleración del agua. En este último caso el Δt de medición debe ser mayor.

Para saber con que Δt trabajar se prueba con 30, 60, 90, 120, 150 segundos, y donde se estabilice la velocidad, se adopta ese Δt . Habitualmente, se trabaja con $\Delta t = 60$ seg.

Es importante en esto no ahorrar tiempo de medición, no apurarse en hacer el aforo, trabajar con responsabilidad.

En la determinación del número de verticales en la sección hay que tener presente que al aumentar el N° de verticales se tiene mayor precisión en el aforo.

Existen distintos criterios para determinar el N° de verticales:

- + Que no pase más del 10 % del caudal total entre 2 verticales.
- + Para mayor precisión, que no pase más del 5 % del caudal entre 2 verticales.
- + Recorriendo la sección mojada, se coloca una vertical en los puntos de quiebre.

Una receta es que con 10 verticales se realizan buenos aforos, y con 15 verticales muy buenos.

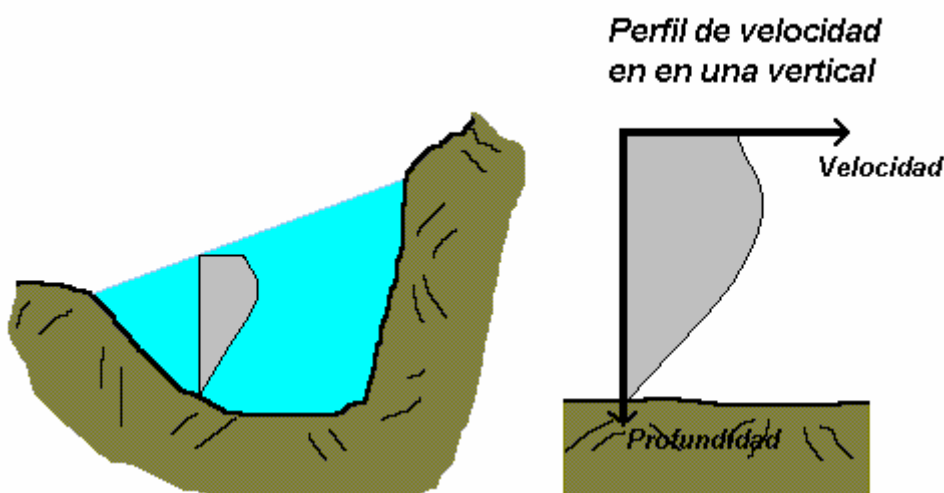
Esto también depende del ancho de la sección a aforar: a mayor ancho, mayor número de verticales.

- El número de puntos de medición de velocidad por cada vertical va desde 1 hasta 10. Depende de la profundidad de esa vertical y de si es un cauce natural o artificial.

Cuanto más profundidad tenga en la vertical y flujo no uniforme, mayor número de mediciones por vertical se deberá hacer.

En todos los casos (cualquiera sea la cantidad de puntos que se adopte en la vertical), lo que se pretende hacer es transformar velocidades puntuales medidas con el molinete en la media o promedio de esa vertical.

El más preciso es el método de los puntos múltiples, consiste en medir en la vertical cada 10 % de la profundidad , más la medición en superficie y la de fondo. La distancia mínima entre punto y punto está dada por el diámetro de la hélice. Este método permite dibujar con mayor definición la curva de velocidades en la vertical, que por lo general tiene esta forma:



Se lo utiliza como método patrón, pero tiene el inconveniente de que se necesitan muchos puntos de medición, es decir, que se incrementa mucho el trabajo de campo y también de gabinete.

Se ha simplificado este método para distintas circunstancias: método de los 5 puntos, de los 3 puntos, de los dos puntos, de un punto y de la velocidad superficial.

El método de los 5 puntos se aplica normalmente a ríos, cuya fórmula es:

$$V_{\text{media vertical}} = (V_{\text{superficial}} + 3 V_{0,2} + 2 V_{0,6} + 3 V_{0,8} + V_{\text{fondo}}) / 10$$

donde:

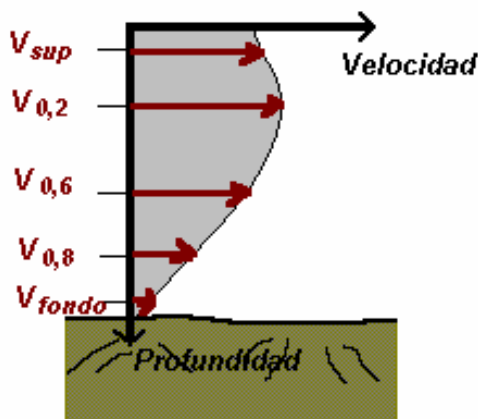
$V_{\text{superficial}}$ = velocidad superficial, es aquella medida cuando el agua justo tapa la hélice totalmente (no tiene que quedar ninguna parte de la hélice fuera del agua).

$V_{0,2}$ = Velocidad medida ubicando el centro de la hélice al 20 % de la profundidad. Siempre midiendo desde la superficie del agua hacia el fondo.

$V_{0,6}$ = Velocidad medida al 60 % de la profundidad.

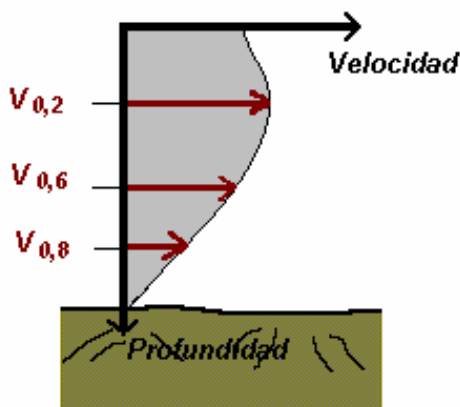
$V_{0,8}$ = Velocidad medida al 80 % de la profundidad.

V_{fondo} = Velocidad de fondo, medida lo más cerca posible del fondo, sin que la hélice choque con el piso.



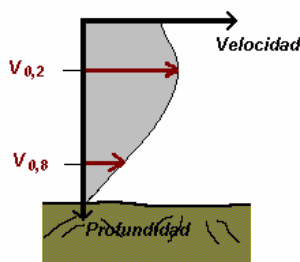
El método de los 3 puntos se aplica también en ríos, así como también en canales y acequias. Se utiliza mucho en canales de riego cuando se quiere tener mucha precisión. Su fórmula es una simplificación de la anterior:

$$V_{\text{media vertical}} = (V_{0,2} + V_{0,6} + V_{0,8}) / 3$$



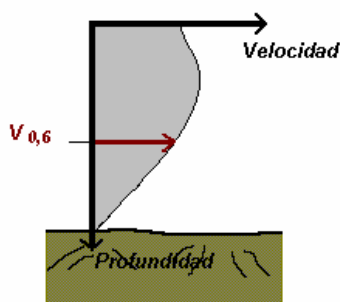
El método de los 2 puntos consiste en asumir que la media vertical es el promedio entre las mediciones hechas al 20 % y al 80 %:

$$V_{\text{media vertical}} = (V_{0,2} + V_{0,8}) / 2$$



El método de 1 punto supone que la velocidad media de la vertical está a 0,6 de la profundidad:

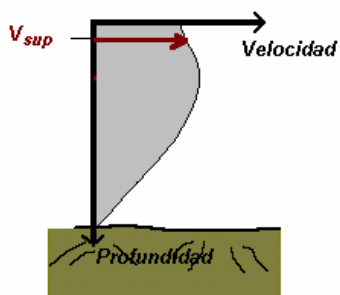
$$V_{\text{media vertical}} = V_{0,6}$$



Anda muy bien para aforos en canales o acequias uniformes de poca profundidad, sobre todo si son revestidos.

El método de la velocidad superficial consiste en asumir que la velocidad media en la vertical se la calcula con la velocidad superficial afectada por un coeficiente:

$$V_{\text{media vertical}} = V_{\text{superficial}} * \text{coeficiente}$$



Es el método menos preciso (no es recomendable), no sólo porque requiere un coeficiente para transformar la velocidad superficial en media vertical, sino porque ese coeficiente no es muy estable (varía). Por lo general el coeficiente es 0,85.

Diferentes maneras de efectuar un aforo con molinete hidrométrico:

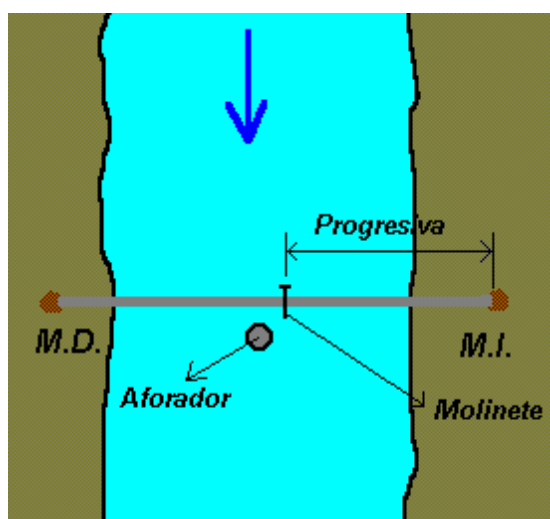
- Método por vadeo:

Se lo utiliza en ríos de escasa profundidad y velocidad, y casi siempre en canales y acequias.

El equipo utilizado normalmente es un molinete suspendido por barra.

Es un método muy recomendado porque permite que el operador, una vez que identificó el punto de medición, puede recorrer y detectar cualquier cambio del fondo al detalle, aunque el agua sea turbia.

Para determinar la distancia horizontal se tiende una cinta métrica común de margen a margen, de tal manera que el aforador, donde considere necesario, ubique la vertical directamente leyendo de la cinta (es la progresiva de esa vertical):



Por convención, y para uniformizar criterios, se afora desde la margen izquierda (M.I.) hacia la margen derecha (M.D.). Se las identifica en terreno mirando hacia aguas abajo.

Para efectuar correctamente esta operación debe tratar de:

- + orientar bien el molinete.
- + determinar con cuidado las distancias horizontales (controlar que esté bien tensa la cinta métrica).
- + que la barra no se hunda en el fondo y que se mantenga la verticalidad.
- + situarse lo más lejos posible del molinete (hacia aguas abajo y a un costado de la hélice) para que no se distorsione la corriente de agua.

Lo conveniente es que sea un equipo de 2 personas y como máximo 3. Uno o dos que vadeen con el aparato y el otro que vaya anotando en una planilla de aforos por cada vertical: la progresiva, la profundidad y los datos que arroje el molinete (revoluciones y tiempos), de acuerdo al método de lectura elegido.

- **Método desde pasarelas o puentes:**

Si la profundidad del curso de agua no permite el vadeo o las condiciones climáticas son adversas (invierno), en los canales o acequias hay que tratar de encontrar pasarelas o puentes que no alteren la sección (sin pilares), de tal manera que permitan aforar de la misma manera que por vadeo, simplemente alargando los tramos de barras, o en su defecto, utilizando cable y contrapeso.

Si en algún lugar en particular de un sistema de riego se necesita aforar periódicamente con molinete y no existe ninguna estructura, se puede colocar tablestacas o perfiles de hierro, de tal manera que se pueda trabajar arriba de ellos sin riesgos (en algunos canales principales del río Dulce existe este tipo de estructuras).

En el caso del río Salado existen pasarelas de material muy estables sobre el mismo río que permiten aforar con total seguridad, cuya estructura no posee ningún elemento que altere los filetes líquidos, lo cual facilita mucho el trabajo y posibilita realizar aforos de precisión.

Hasta 4 ó 5 m se puede aforar con barras, siempre y cuando la velocidad de la corriente no sea excesiva, porque pueden vibrar mucho.

En el caso específico de aforo desde puentes convencionales es muy cuestionado, no obstante, la mayor parte de las estaciones de aforo están ubicadas sobre ellos.

Normalmente la sección varía periódicamente, ya sea por sedimentación o excavación, pero es muy fácil aforar desde ellos.

El problema se plantea en las crecidas, donde las líneas de corriente se distorsionan, existe mucha turbulencia y cambia mucho la sección.

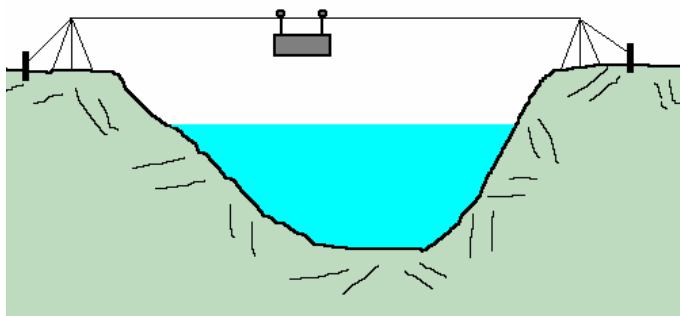
Lo más común es el uso de puentes viales y ferroviarios.

Si la distancia hace que sea complicado el uso de barras se puede usar el molinete con cola direccional, torno y contrapeso de acuerdo a la velocidad del agua (a mayor velocidad, mayor peso del contrapeso).

En este último caso, se trabaja de manera similar a los anteriores, donde la profundidad se obtiene introduciendo el molinete hasta que toque fondo, poniendo en cero el contador de profundidad, luego se lo va ascendiendo con el torno hasta que el centro de la hélice coincida con la superficie del agua, ese es el valor de la profundidad en la vertical.

En el lugar de medición se arma el equipo y se marcan las verticales donde se va a medir. Se puede trabajar hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, siendo recomendable hacerlo hacia aguas arriba, porque se distorsionan menos los filetes líquidos y se puede ver camalotes, ramas o cualquier otro material flotante que pueda engancharse el equipo y provocar inconvenientes.

- El **método del telesférico o cable vagoneta** requiere de una vagoneta que se desplace en un cable de acero:



Consta de 2 torres y un cable de acero graduado. La vagoneta tiene espacio para 2 personas generalmente, una mueve la vagoneta y la otra afora.

Puede ser peligroso en ríos muy crecidos o fuertes vientos, sobre todo cuando la vagoneta toca el agua.

Su costo inicial es elevado, pero de bajo mantenimiento posterior. Su implementación tiene sentido únicamente en estaciones hidrométricas permanentes.

- Otros métodos de aforos son: **desde bote**, o **con doble torno**. El caso de bote es para suplir la falencia de puentes o pasarelas en ríos de un ancho considerable. Mientras que el caso del doble torno es algo similar al de cable vagoneta, con la diferencia que el molinete se maneja desde una de las orillas, donde uno de los tornos permite el desplazamiento horizontal y el otro el desplazamiento vertical (son 2 métodos que no se desarrollarán en este Curso, por no ser parte específica de los objetivos prefijados para el mismo).

Condiciones que debe cumplir el curso de agua que se quiere aforar con molinete hidrométrico:

Cuando se planifica aforar en una zona, se debe verificar ciertas condiciones del curso de agua (río, canal, acequia):

1- La sección de aforo se debe ubicar en un tramo recto, porque asociado a esto está la distribución de velocidades. Como criterio, que el tramo sea por lo menos 6 veces la longitud transversal donde se piensa aforar.

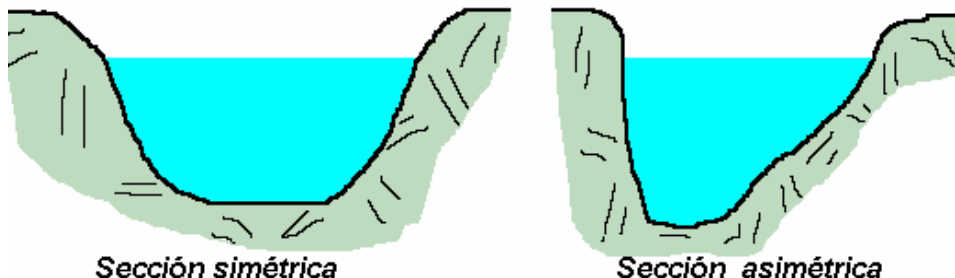
2- En una estación de aforo permanente el cauce tiene que ser lo más estable posible. Esto está asociado a la posibilidad de calcular curvas altura-caudal, de tal manera de que con una simple medición de la altura de agua obtenga el caudal, ahorrándonos todo el trabajo de los aforos. Esto no es posible si la sección cambia, ya que para una misma altura de agua pasarán caudales distintos.

3- Las velocidades del curso de agua deben ser medibles, debiéndose descartar secciones de aforo donde aparezcan zonas de aguas muertas (velocidad nula), contracorrientes, velocidades muy bajas o demasiado altas.

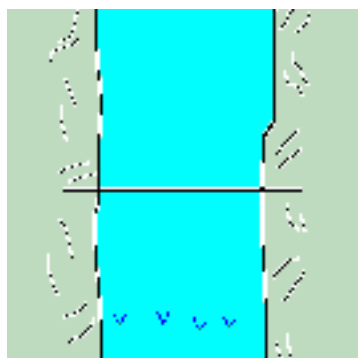
Las velocidades muy bajas pueden estar condicionadas por la sensibilidad del molinete. Mientras que para velocidades muy altas, ma-

yores a 3 m/seg, se puede dificultar el trabajo de campo (sostener el molinete en el lugar que se pretende medir).

4- Es conveniente una distribución más o menos uniforme de las velocidades, condicionada por la sección:



5- Las líneas de corriente o filetes líquidos deben ser perpendiculares a la sección de aforo:



6- La sección de aforos debe estar libre de obstáculos, donde se debe limpiar ramas, pastos o cualquier vegetación acuática que esté próxima aguas arriba y aguas abajo, ya que esto está asociado a la rugosidad: a mayores obstáculos implica que más se frena el agua.

7- El acceso en las estaciones hidrométricas permanentes se debe realizar para todos los niveles del curso de agua, sobre todo en crecidas en el caso de cursos naturales. Es un dato muy importante el del caudal máximo de crecida.

8- La sección de aforos situada aguas arriba de cualquier estructura que embalse agua (una compuerta o una represa) debe estar alejada de ésta lo suficiente como para que la elevación del pelo de agua del endicamiento sea despreciable en el área de trabajo (el efecto de remanso).

Si no sucede eso, al cerrar la compuerta, el nivel del agua en la sección de aforo se elevará, pero seguirá pasando el mismo caudal, es decir, que para un mismo caudal puedo tener alturas de agua distintas, dependiendo del grado de apertura de la compuerta situada aguas abajo.

9- La sección de aforos debe ser sensible. Esto quiere decir que para una variación de caudal, aunque sea leve, experimente una variación de nivel de agua. Una sección es más sensible que otra si para la misma variación de caudal experimenta una mayor variación de nivel de agua.

Cálculo de aforos con molinete – Tareas de Gabinete:

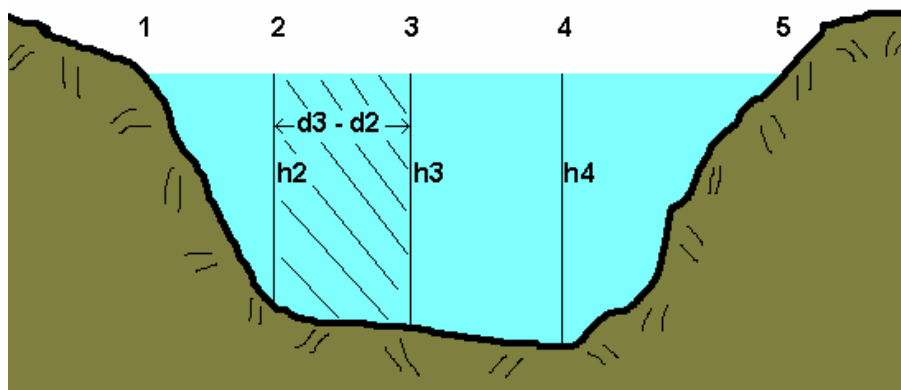
Cuando se efectúa un aforo, en campo se obtiene para cada vertical determinada su progresiva (distancia horizontal al punto fijo de la margen izquierda), su profundidad y los valores obtenidos del molinete (dependiendo del método que se ha elegido para calcular las velocidades medias verticales: 1 punto, 3 puntos, etc.)

Ahora se deben trabajar esos datos en gabinete, para poder obtener el caudal que pasaba en el momento que se hizo el aforo.

Se utiliza la fórmula general $Q = \text{Sup} \times \text{Vel}$ para calcular los caudales parciales. Se lo puede hacer de 2 maneras:

- Método de la sección media.
- Método de la semisección.

En el **Método de la sección media** se van calculando los caudales parciales que pasan entre las verticales, para luego sumarlos y obtener el caudal total. Por ejemplo, si se tiene un aforo con 5 verticales:



El caudal parcial que pasa entre las verticales 2 y 3 se calcula mediante la fórmula:

$$Q_{2-3} = (d_3 - d_2) \times ((h_2 + h_3) / 2) \times ((V_2 + V_3) / 2)$$

Donde:

$d_3 - d_2$ = distancia horizontal de la sección parcial entre las verticales 2 y 3 (diferencia de progresivas).

$(h_2 + h_3) / 2$ = promedio de la profundidad en la sección parcial entre 2 y 3.

$(d_3 - d_2) \times ((h_2 + h_3) / 2)$ = sección parcial entre 2 y 3.

$(V_2 + V_3) / 2$ = velocidad media en la sección parcial entre 2 y 3.

Para el caso particular de los bordes: los caudales que pasan entre 1 y 2 y entre 4 y 5 se aplica la misma fórmula, teniendo en cuenta que:

$$h_1 = 0; \quad h_5 = 0; \quad V_1 = 0; \quad V_5 = 0$$

Por lo tanto:

$$Q_{1-2} = (d_2 - d_1) \times ((0 + h_2) / 2) \times ((0 + V_2) / 2)$$

$$Q_{4-5} = (d_5 - d_4) \times ((h_4 + 0) / 2) \times ((V_4 + 0) / 2)$$

Lo recomendable es que las verticales próximas a las márgenes, en este caso las verticales 2 y 4, estén lo más cerca posible de esos extremos, de tal manera que el caudal que pase por allí (entre 1-2 y entre 4-5) sea insignificante.

Ejemplo:

Calcular el caudal que pasa por una acequia, habiéndose aforado con 6 verticales, adoptándose el método de 3 puntos para calcular la velocidad media vertical (midiendo a 0,2, a 0,6 y a 0,8 de la profundidad) cuyos valores de campo se especifican con negro (—), y los calculados en gabinete con azul (—), teniendo en cuenta que las curvas de calibración del molinete que se utilizó para aforar son:

Para rev/tiempo (m) < 1,74 es **Vel = 24,73 x rev / tiempo + 1,23**
 Para rev/tiempo (m) > 1,74 es **Vel = 25,68 x rev / tiempo – 0,42**

Estando expresadas esas velocidades en [cm/seg]. Para pasarlas a [m/seg] se las divide por 100 y se coloca ese valor en Tabla (en la columna de Vel. puntual), según se puede visualizar:

Vertical	Dist . (m)	Prof. (m)	Prof. media (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Revoluciones	Tiempo (seg)	Prof. de Obs.	Vel. puntual (m/seg)	Vel. Media Vertical (m/seg)	Vel. media del área	Caudal (m ³ /seg)	
1	0,15	0,00							0,00	0,00			
			0,105	0,10	0,011						0,255	0,003	
2	0,25	0,21				136	60	0,2	0,578	0,510			
						122	60	0,6	0,518				
						102	60	0,8	0,433				
			0,235	0,20	0,047						0,590	0,028	
3	0,45	0,26				169	60	0,2	0,719	0,669			
						162	60	0,6	0,689				
						141	60	0,8	0,599				
			0,250	0,20	0,050						0,635	0,032	
4	0,65	0,24				159	60	0,2	0,676	0,601			
						137	60	0,6	0,582				
						128	60	0,8	0,544				
			0,205	0,20	0,041						0,528	0,022	
5	0,85	0,17				132	60	0,2	0,561	0,454			
						102	60	0,6	0,433				
						86	60	0,8	0,367				
			0,085	0,10	0,009						0,227	0,002	
6	0,95	0,00							0,00	0,00			
Área total = 0,158					Caudal total = 0,087								

Un dato que interesa es cual es la velocidad media en la sección de aforo, siendo la relación entre el caudal y la sección totales:

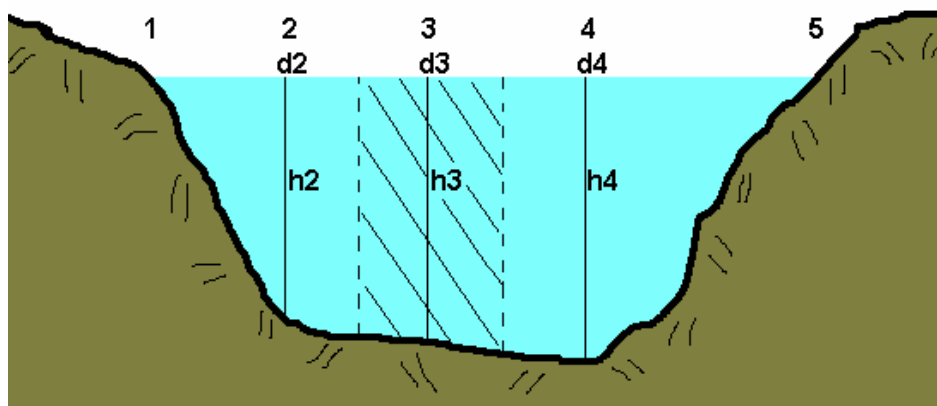
$$Vel_{\text{media sección}} = Q_{\text{total}} / \text{Área}_{\text{total}} = 0,087 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,158 \text{ m}^2 = \mathbf{0,55 \text{ m/seg}}$$

Anotándose, además otros datos que hacen a la clasificación de estos aforos y su posterior archivo y que permita consultarlos cuando se necesite en estudios hidrológicos e hidráulicos, como ser:

- Nombre del curso de agua.
- Lugar.
- Fecha.
- Hora de inicio y de fin del aforo.
- Altura del agua al inicio y al final, sobre todo si existe una estación de aforos con escala hidrométrica permanente.
- Curvas de calibración del molinete que se utilizó.
- Tipo de molinete que se utilizó, N° identificadorio.
- Método de aforo (por vadeo, desde puente, etc.).
- Nombre de los aforadores.

Y cualquier otro tipo de dato que se considere de importancia.

En el **Método de la semisección** también se trabaja calculando caudales parciales. Para ello se toma como real a la velocidad en cada vertical (como velocidad media de la sección parcial), lo mismo sucede con la profundidad en la vertical (tomándola como profundidad media en la sección parcial), siendo el área de influencia de cada vertical la mitad de la sección entre verticales hacia ambos lados:



La fórmula de cálculo para el caudal que pasa por el área de influencia de la vertical 3 es:

$$Q_3 = ((d_4 - d_3) / 2 + (d_3 - d_2) / 2) \times h_3 \times V_3$$

Donde:

$(d_4 - d_3) / 2$ = es la distancia horizontal que se toma como influencia de la vertical 3 hacia la derecha.

$(d_3 - d_2) / 2$ = es la distancia horizontal que se toma como influencia de la vertical 3 hacia la izquierda.

h_3 = profundidad en la vertical 3 que se asume como profundidad promedio de la sección parcial.

$((d_4 - d_3) / 2 + (d_3 - d_2) / 2) \times h_3$ = sección parcial de influencia de la vertical 3.

V_3 = velocidad media en la vertical 3, asumida como la velocidad media en la sección parcial.

En el caso particular de los extremos se extiende el área de influencia de la segunda y anteúltima vertical, por lo cual se deben tomar lo más cerca posible de las orillas. Teniendo en cuenta las 5 verticales anteriores, los caudales en los extremos se calculan con las fórmulas:

Para la margen izquierda:

$$Q_2 = ((d_3 - d_2) / 2 + (d_2 - d_1)) \times h_2 \times V_2$$

Para la margen derecha:

$$Q_4 = ((d_5 - d_4) + (d_4 - d_3) / 2) \times h_4 \times V_4$$

Teniendo en cuenta el ejemplo del Método de la sección media, si calculamos con los mismos datos de campo por el Método de la semisección:

Vertical	Dist . (m)	Prof. (m)	Prof. Media (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Revolu- Ciones	Tiempo (seg)	Prof. de Obs.	Vel. puntual (m/seg)	Vel. Media Vertical (m/seg)	Vel. media del área	Caudal (m ³ /seg)	
1	0,15	0,00							0,00	0,00			
2	0,25	0,21	0,21	0,20	0,042	136	60	0,2	0,578	0,510	0,510	0,021	
						122	60	0,6	0,518				
						102	60	0,8	0,433				
3	0,45	0,26	0,26	0,20	0,052	169	60	0,2	0,719	0,669	0,669	0,035	
						162	60	0,6	0,689				
						141	60	0,8	0,599				
4	0,65	0,24	0,24	0,20	0,048	159	60	0,2	0,676	0,601	0,601	0,029	
						137	60	0,6	0,582				
						128	60	0,8	0,544				
5	0,85	0,17	0,17	0,20	0,034	132	60	0,2	0,561	0,454	0,454	0,015	
						102	60	0,6	0,433				
						86	60	0,8	0,367				
6	0,95	0,00							0,00	0,00			
Área total = 0,176						Caudal total = 0,100							

Siendo la velocidad media en la sección total:

$$\text{Vel}_{\text{media sección}} = Q_{\text{total}} / \text{Área}_{\text{total}} = 0,100 \text{ m}^3/\text{seg} / 0,176 \text{ m}^2 = \mathbf{0,57 \text{ m/seg}}$$

Existen otros métodos de cálculo, como ser aquellos casos en que varía el nivel del agua durante el aforo, para lo cual se calculan por el Método del factor de corrección o por el Método del aforo continuo, pero escapan a los objetivos de este Curso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- J. Nolting y A. Requena “CURSO DE MANEJO DE RIEGO POR SUPERFICIE A NIVEL DE PREDIO” INTA – Alto Valle. (1.995).
- R. Bagini “AFORADOR DE CRESTA ANCHA” Folleto N° 108 del INTA – Mendoza. (1.994).
- M. Bos, J. Replogle y A. Clemmens “AFORADORES DE CAUDAL PARA CANALES ABIERTOS” Publicación N° 38 del International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI – Wageningen – Holanda. (1.986).
- R. Ghiggia “AGUAS DE CORRIENTES SUPERFICIALES E HIDROMETRÍA” de la Fac. de Agronomía de la Univ. de la República de la República Oriental del Uruguay. (1.977).
- M. A. Kholer, R. K. Linsley y J. L. H. Paulus. “HIDROLOGÍA PARA INGENIEROS”. 2da. Edición. Editorial Mc Graw-Hill Latinoamericana. (1.975).
- Servicio de Conservación de Suelos del Dpto. de Agricultura de los EEUU “MEDICIÓN DEL AGUA DE RIEGO” Edit. Diana – México. (1.973).