

AFORO DEL AGUA

EN CANALES Y TUBERÍAS

**Gregorio Briones
Sánchez
Ignacio García
Casillas**

trillas 

AFORO DEL AGUA

EN CANALES Y TUBERÍAS

**Gregorio Briones Sánchez
Ignacio García Casillas**

**EDITORIAL
TRILLAS**



México. Argentina. España.
Colombia. Puerto Rico. Venezuela

Catalogación en la fuente

Briones Sánchez, Gregorio

Aforo del agua : en canales y tuberías. - México :

Trillas : UAAAN, 1997.

92 p. : il. ; 23 cm.

ISBN 968-24-5470-0

*I. Corrientes - Medición. I. García Casillas,
Ignacio. II. t.*

D- 628.177'B259a

LC- TD500'B7.3

PAPA CIVIL LOJA

*La presentación y disposición en conjunto de
AFORO DEL AGUA, EN CANALES Y TUBERÍAS
son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra
puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema
o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado,
la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento
de información), sin consentimiento por escrito del editor*

Derechos reservados

*© 1997, Editorial Trillas, S. A. de C. V.,
Av. Río Churubusco 385, Col. Pedro María Anaya,
C.P. 03340, México, D. F.
Tel. 6884233, FAX 6041364*

*División Comercial, Calz. de la Viga 1132, C.P. 09439
México, D. F., Tel. 6330995, FAX 6330870*

*Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial. Reg. núm. 158*

Primera edición, 1988

Segunda edición, julio 1997

(primera publicada por Editorial Trillas, S. A. de C. V.)

ISBN 968-24-5470-0

Impreso en México

Printed in Mexico

Presentación

En este manual se presenta el principio hidráulico, teoría y aplicaciones de los métodos de aforo, generalmente recomendados para la medición del agua en canales y tuberías, ha sido escrito con la finalidad de colaborar en el proceso de aprendizaje del estudiante de agronomía, especialmente en lo referente al aforo del agua de irrigación, aunque también puede ser empleado como material de consulta por técnicos y profesionistas relacionados con la medición del gasto y control de los recursos hidráulicos.

Uno de los primeros pasos requeridos para mejorar la eficiencia en el uso y conservación del agua es la instalación de un medidor de gasto o la adopción de algún método de aforo seleccionado para las condiciones de la medición, rango de caudales y nivel de precisión deseado.

LOS AUTORES

Generalidades

Finalidades de la medición del agua

La medición del gasto es de gran utilidad en la toma de decisiones durante la administración de los recursos hidráulicos, en la ejecución de los programas de riego y en diversas actividades relacionadas con el manejo del agua, entre estas últimas se mencionan las siguientes:

- a) Control de la cantidad de agua de riego entregada a cada usuario en un distrito de riego.
- b) Registro del volumen de agua potable consumido por residencias en las ciudades.
- c) Detección de problemas potenciales en el funcionamiento de una bomba o en la operación de un sistema de riego.
- d) Registro continuo de los abatimientos de un acuífero a fin de regular las extracciones, especialmente donde tal recurso es limitado.
- e) Determinación de las pérdidas de agua, por conducción en las redes de distribución y evaluación de la factibilidad del revestimiento en acequias y canales de tierra.
- f) Calibración de estructuras de aforo y determinación de los coeficientes empíricos para su ecuación de descarga.
- g) Pruebas de capacidad en bombas para determinación de la curva característica de operación.

- h) Ensayos con turbinas para fines hidroeléctricos y de modelación.
- i) Determinación de los escurrimientos pluviales y magnitud de las crecientes en corrientes naturales.
- j) Pruebas de permeabilidad en acuíferos, para determinación de la producción específica y evaluación de la factibilidad de la recarga artificial.
- k) Medición de la capacidad de un sistema de drenes, en lugares con nivel freático elevado.

Métodos para el aforo de caudales

Cuando el agua se obtiene de diques, ríos, canales y acequias, pueden utilizarse vertedores, canaletas, orificios, molinetes, flotadores, colorantes y sales para aforarla. Sin embargo, cuando el agua es conducida por tuberías, las mediciones pueden hacerse con venturímetros, orificios, medidores de hélice, tubos Pitot, tubo California, boquillas, tubo ranurado y medidores eletromagnéticos (4).

Los métodos gravimétricos y volumétricos de aforo directo, que consisten en tomar el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, se utilizan en la medición de pequeños gastos, como por ejemplo en el aforo de aspersores, goteros, microaspersores y grifos caseros, en la calibración de sifones, orificios y también durante pruebas de laboratorio con pequeñas bombas (11, 17).

Por su parte, las mediciones del escurrimiento pluvial y del flujo de aguas subterráneas, son difíciles de realizar con precisión, por lo cual se usan métodos aproximativos que incluyen trazadores químicos y radiactivos (8).

Clasificación de los métodos de aforo

En general, los métodos para medir un gasto o caudal de agua se pueden clasificar en tres grupos (15), mismos que se pre-

sentan a continuación; así como las modalidades empleadas dentro de cada uno.

Métodos de aforo directo. Expresan el gasto como una función de volumen sobre tiempo ($Q = V/t$). Entre ellos se tienen el aforo gravimétrico, volumétrico, químico y los medidores de hélice, fabricados de acuerdo con el mismo principio. Otro método de aforo directo consiste en medir el descenso en el nivel del agua y el tiempo de vaciado en un depósito con dimensiones conocidas.

Métodos área-velocidad. Expresan el gasto como un producto del área transversal de la corriente, multiplicada por su velocidad promedio ($Q = Av$). Normalmente el área, perpendicular al flujo, se obtiene midiendo la geometría de la sección transversal y, la velocidad de caudal, se puede determinar con molinetes, flotadores, tubos Pitot, colorantes, soluciones salinas, trazadores químicos y radiactivos o aplicando el método de la trayectoria.

$$Q = Av$$

Métodos que emplean secciones contraídas y otros dispositivos. Se caracterizan por expresar el gasto como una función exponencial de la forma: $Q = Kh^x$, donde la carga hidráulica (h) es elevada a un exponente (x) y multiplicada por un coeficiente de descarga (K). La variable de medición es la carga hidráulica y durante una calibración cuidadosa deben determinarse K y x , previamente. Dentro de esta categoría se encuentran los vertederos, orificios, canaletas Parshall, medidores Venturi, compuertas comerciales, sifones y tubos cortos.

$$Q = Kh^x$$

En la presente obra se describen tales métodos de aforo, así como las ecuaciones correspondientes para cada uno y sus aplicaciones.

Índice de contenido

Presentación	5
Generalidades	7

Cap. 1. Métodos de aforo directo

Aforo volumétrico, 15. Aforo gravimétrico, 16. Aforo químico o del trazador, 16. Medidores de hélice, 19. Aforo por medición del cambio en el nivel del agua de un depósito, 23.

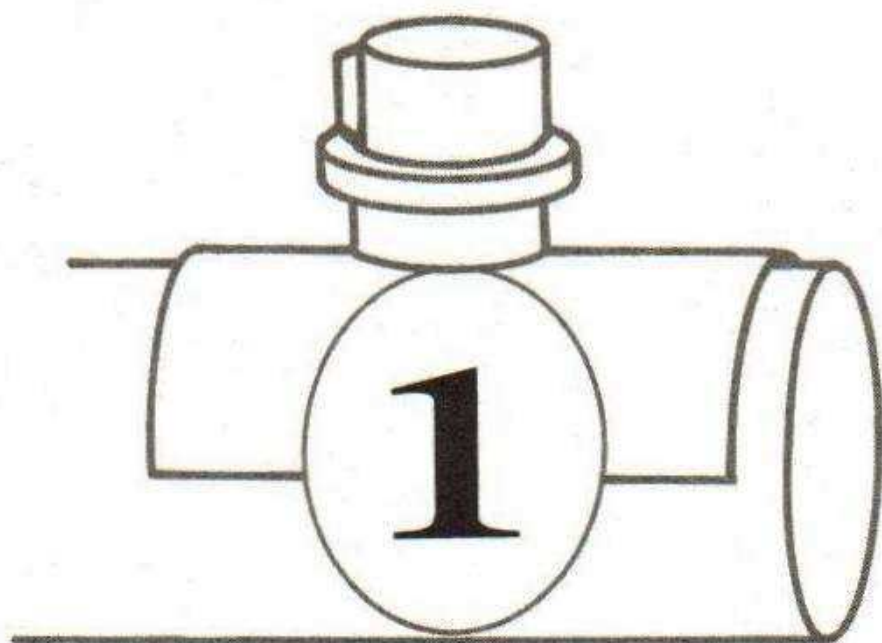
Cap. 2. Métodos área-velocidad

Método del flotador, 29. Método del molinete hidrométrico, 32. Aforo de la descarga libre en tuberías, por el método de la trayectoria, 37. Método del tubo Pitot, 43.

Cap. 3. Métodos que utilizan contracciones

Medidores Venturi, 51. Flujo a través de orificios y compuertas, 59. Descarga en vertederos, 63. Canaleta de medición Parshall, 68. Sifones, 77.

Ejercicios propuestos	83
Referencias bibliográficas	87
Índice analítico	89



Métodos
de
aforo directo

Aforo volumétrico

Es aplicable en la medición de pequeños caudales y se realiza midiendo el tiempo de llenado (t) de un recipiente de volumen conocido (V), donde se colecta la descarga, como se muestra en la figura 1.1, determinando el gasto con la ecuación:

$$Q = V/t$$

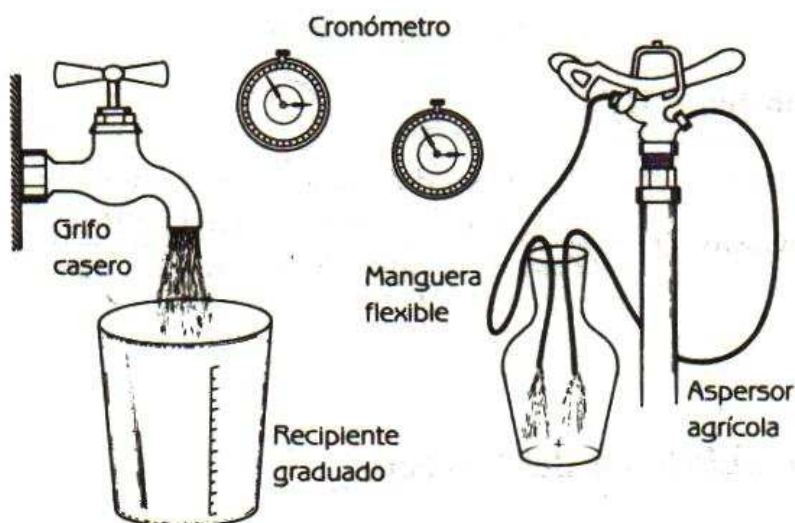


Figura 1.1. Aforo volumétrico de un grifo casero y de un aspersor agrícola de doble boquilla.

Aforo gravimétrico

Se sigue un procedimiento similar al anterior, pero el volumen colectado de agua en el intervalo de tiempo cronometrado, en lugar de medirse se pesa, y el peso (W) del agua se transforma a volumen, dividiéndolo entre el peso específico (w) del fluido a la temperatura de prueba.

El recipiente vacío debe ser previamente destarado y, una vez lleno, debe pesarse en la misma balanza. Mediante el método gravimétrico, el gasto aforado se determina con el siguiente razonamiento:

$$\text{Peso específico, } w = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Volumen ocupado}} = \frac{W}{V}$$

de donde:

$$V = W/w$$

y por tanto:

$$\text{Gasto, } Q = W/wt$$

o también:

$$\text{Gasto, } Q = \frac{\text{Peso del agua} + \text{recipiente} - \text{Tara del recipiente}}{\text{Peso específico} \times \text{Tiempo de llenado}}$$

(Ec. 1)

Aforo químico o del trazador

En los aforos químicos o radiactivos se añade de forma continua y constante una concentración conocida (C_1) de una sustancia química o radiactiva a la corriente cuyo caudal (Q) desea

determinarse. Por la estequiometría de las reacciones químicas, cuando un gasto constante (q) de una solución salina es descargado dentro del caudal (Q), conteniendo las mismas constituyentes a la concentración (C_2), la mezcla resultante de caudales ($Q + q$) alcanzará una concentración (C) proporcional a las concentraciones iniciales (C_1 y C_2) de los gastos antes del mezclado, como lo indica la siguiente expresión (10):

$$qC_1 + QC_2 = (Q + q)C$$

o sea:

$$q(C_1 - C) = Q(C - C_2), \text{ siendo } C_1 > C > C_2$$

de lo cual se obtiene:

$$Q = \frac{q(C_1 - C)}{C - C_2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

Q = Caudal de la corriente aforada en ℓ/s o en m^3/seg .

q = Caudal del trazador o de la solución salina aplicada, en ℓ/s o en m^3/seg .

C_1 = Concentración del trazador o de la sustancia química en la solución.

C_2 = Concentración del trazador o de la sustancia química antes de la aplicación.

C = Concentración del trazador o de la sustancia química después de la aplicación.

Para el aforo químico se emplea generalmente la sal de cocina (NaCl), la cual, por conveniencia, se disuelve a razón de 260 g/ ℓ de agua antes de introducirla en la corriente. La solución salina eleva la conductividad eléctrica del agua, la cual puede ser determinada con el puente Wheatstone.

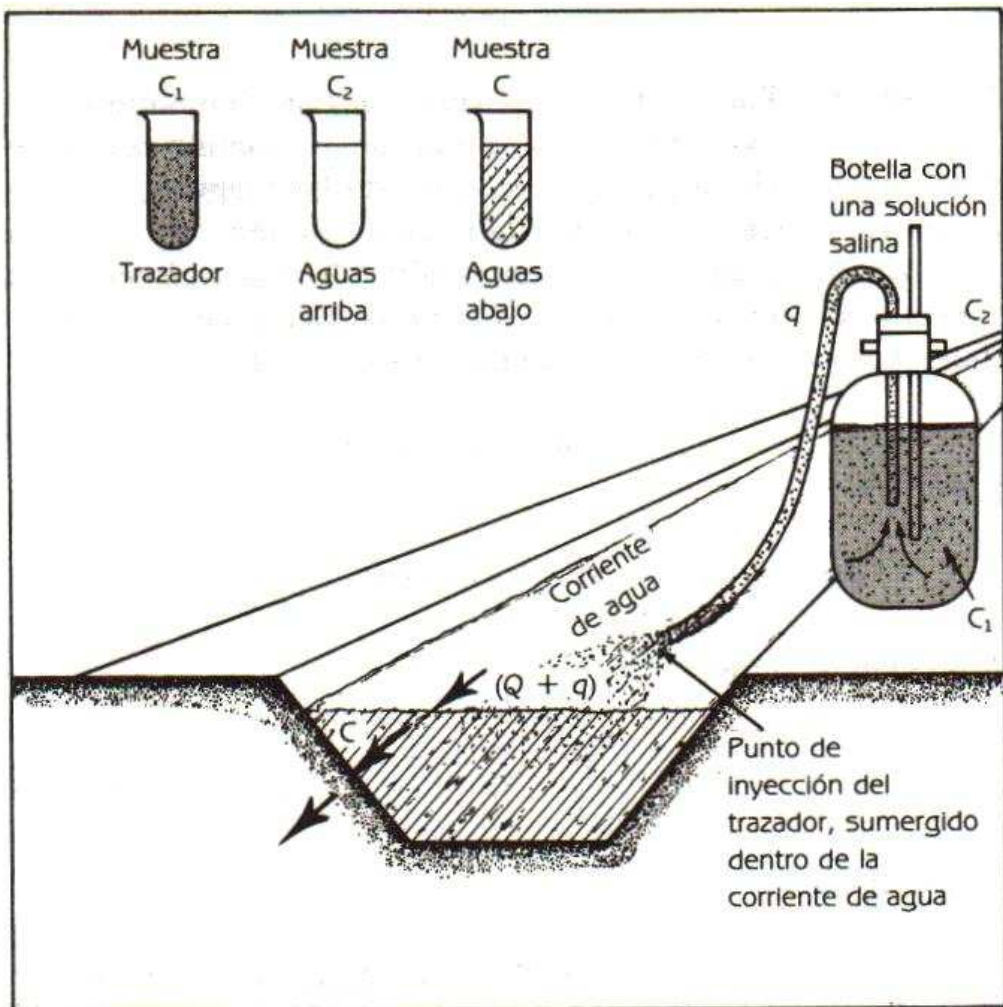


Figura 1.2. Aforo químico de una corriente y toma de muestras.

Para aplicar el método se necesita conocer la conductividad eléctrica en tres muestras de agua, la primera muestra (C_1) es tomada de la solución salina, la segunda muestra (C_2) se toma aguas arriba, poco antes del punto de aplicación; y la tercera muestra (C) es colectada a una distancia aguas abajo del punto de inyección, donde se asegure el completo mezclado de la sal con el agua de la corriente.

Un gasto constante (q) de solución salina se puede aplicar utilizando una botella Mariotte construida con un garrafón, un

tapón bihoradado y dos tubos de vidrio, como se muestra en la figura 1.2.

En una botella Mariotte el volumen de agua desalojado es restituido por la entrada de aire atmosférico, de tal forma que la presión interna se mantiene constante con respecto al nivel indicado por el extremo sumergido del tubo abierto a la atmósfera.

Cuando se utiliza la solución salina para medir la velocidad de la corriente, sólo se inyecta una porción de la misma. El tiempo de desplazamiento del prisma de agua que contiene la solución, es detectado en dos puntos de control mediante electrodos en contacto con la corriente, conectados a un amperímetro o registrador. A partir de las señales de este último, se calcula la velocidad del caudal, dividiendo la distancia entre los puntos de control, por el tiempo de desplazamiento.

Medidores de hélice

Los medidores de hélice están entre los medidores de gasto más prácticos para el aforo de tuberías debido a que son fáciles de operar, confiables y de instalación simple. Esencialmente, todos los medidores de hélice registran el volumen total de agua que pasa a través de ellos y muchos están equipados con mecanismos adicionales para medir el gasto (4).

Estos medidores de aforo volumétrico directo se caracterizan por una hélice de aleta múltiple construida de caucho, plástico o metal. La hélice hace girar una flecha que comunica el movimiento a la caja del medidor, donde un marcador indica el volumen acumulado, el gasto de la corriente o ambos datos; sobre la carátula graduada. La experiencia ha mostrado que es mejor seleccionar un medidor con transmisión magnética (2, 4, 14) (fig. 1.3).

El diámetro de la hélice varía generalmente entre 50 y 80 % en relación con el diámetro de la tubería y es importante que la hélice esté centrada y que su flecha sea paralela a la línea central de la tubería.

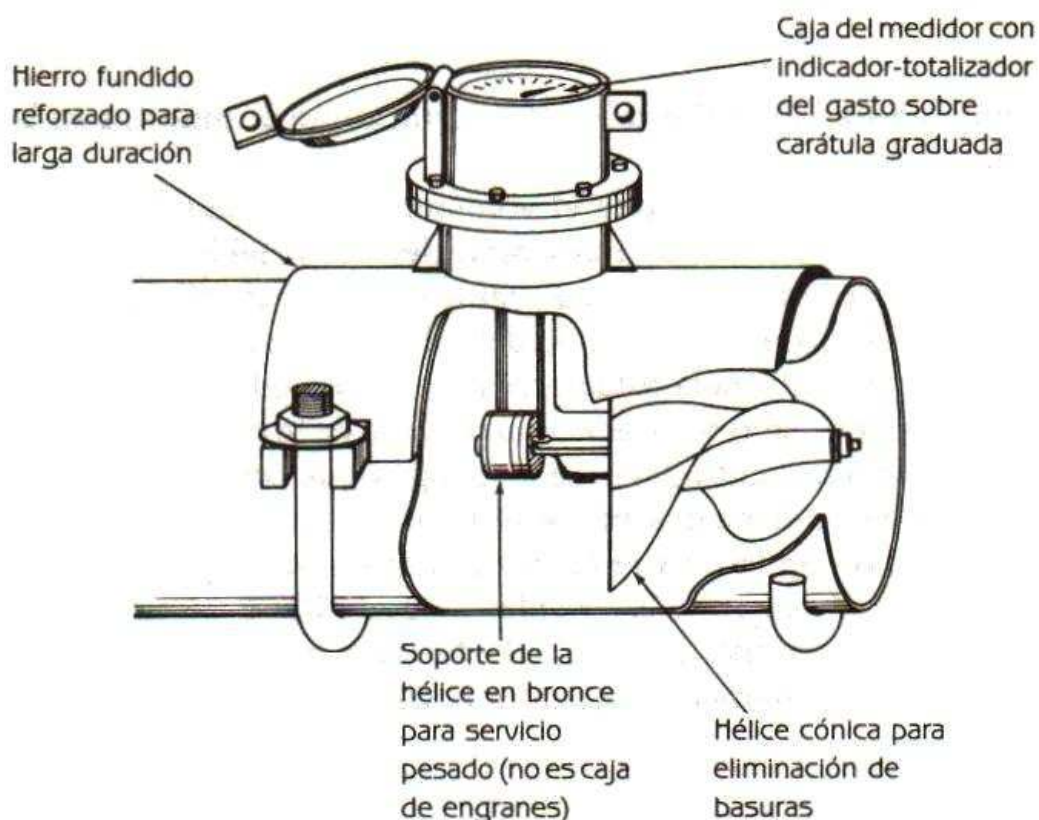


Figura 1.3. Medidor de gasto tipo hélice con transmisión magnética y totalizador de volumen.

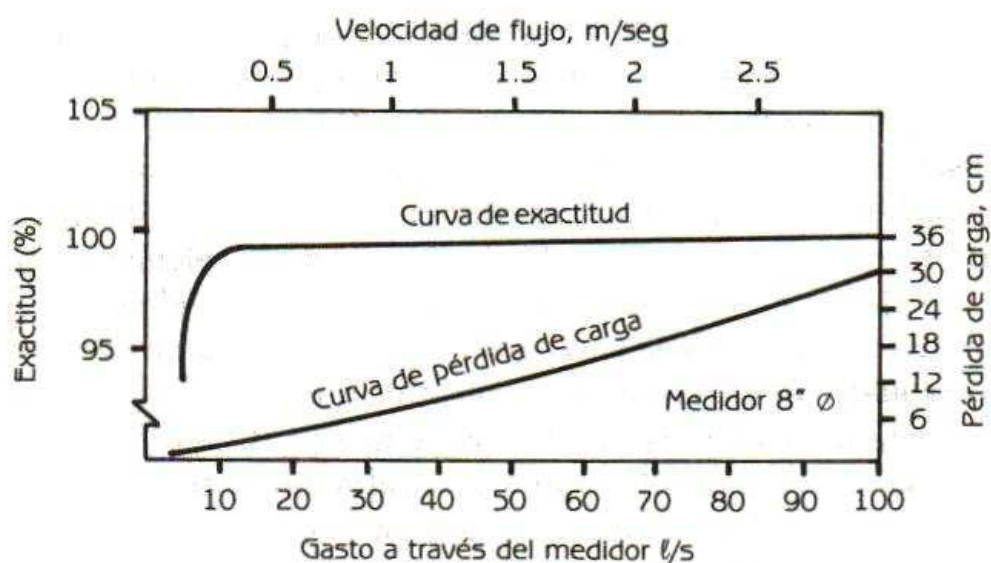


Figura 1.4. Exactitud típica y curva de pérdida de carga para medidores de hélice.

Todos los medidores están diseñados para operar exactamente dentro de un rango específico de gastos y tienden a perder exactitud bruscamente a bajas velocidades de flujo, como lo indica la figura 1.4. También, la turbulencia en la sección del medidor, causada por válvulas, codos, etc., reduce la exactitud de la lectura. Por esta razón, los fabricantes recomiendan un mínimo de cinco diámetros de tubería recta aguas arriba de la hélice y, mínimo, un diámetro de tubería recta aguas abajo del medidor.

Los medidores generalmente son de tipo tubo o de tipo silleta. Los medidores tipo tubo están instalados, de la fábrica, en un tramo de tubería adecuadamente calibrados; sin embargo, muchos irrigadores seleccionan un medidor tipo silleta para instalarlo en su propia tubería. Dichos medidores se pueden apreciar en la figura 1.5.

Cuando no es posible instalar el medidor suficientemente alejado de cualquier turbulencia, el caudal debe uniformarse mediante paletas directrices o mediante una cruz de lámina metálica de 1 o 2 diámetros (\varnothing) de largo, insertada en la tubería, inmediatamente antes del medidor.

El tamaño del medidor que debe ser seleccionado, depende del diámetro de la tubería donde se vaya a instalar, del rango de caudales que serán medidos y de la pérdida de carga característica del medidor.

Si el medidor va a ser utilizado en una instalación permanente, para medir un rango estrecho de caudales, resulta aceptable un tamaño de hélice relativamente pequeño. Sin embargo, cuando se espera medir un rango amplio de caudales, debe seleccionar un tamaño de hélice más grande.

Ya que la exactitud del medidor se pierde a bajas velocidades de flujo; como se mostró anteriormente, el rango de caudales debe ser la primera consideración a tomar en cuenta en las decisiones de compra. En el cuadro 1.1 se enlistan los rangos de gasto comúnmente sugeridos por los fabricantes, para varios tamaños de medidor.

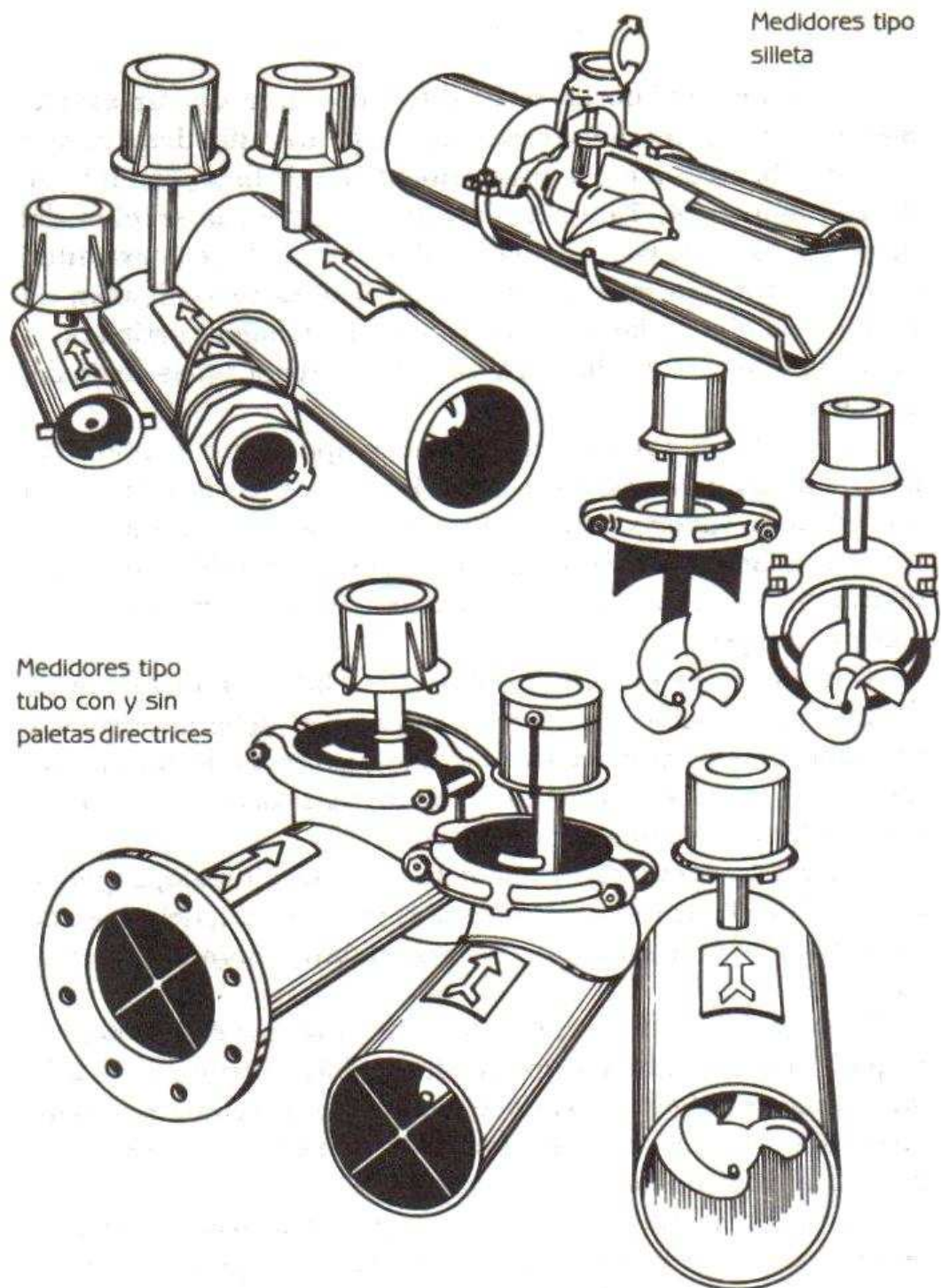


Figura 1.5. Un amplio rango de medidores para irrigación es ofrecida por las firmas comerciales para tuberías de 2" a 72" de diámetro (0.05 a 1.83 m). Poseen capacidades de 2 hasta 2.250 l/s y carátula calibrada en diversas unidades (1).

Cuadro 1.1. Rangos de gasto comúnmente recomendados para los medidores de hélice.

<i>Tamaño del medidor (pulgadas)</i>	<i>Gasto mínimo en l/s</i>	<i>Gasto máximo en l/s</i>
4	3	25
6	6	57
8	6	76
10	8	95
12	10	125

Los medidores de hélice generalmente son instalados en tuberías superficiales en cualquier posición conveniente (vertical, horizontal o en ángulo); también pueden ser instalados en una tubería enterrada, con la caja del medidor por encima del terreno. Es necesario tener presente que las lecturas deben hacerse cuando la tubería tenga un flujo completo.

Aforo por medición del cambio en el nivel del agua de un depósito

Un aforo directo del gasto que entra o sale de un depósito de dimensiones conocidas puede ser hecho midiendo la variación en el nivel del agua en un periodo determinado. Los resultados más confiables se obtienen en depósitos revestidos, donde las pérdidas por percolación están controladas.



Métodos
área-velocidad

Para obtener mayor aproximación en la determinación del gasto en canales y tuberías, con la aplicación de estos métodos, es importante medir la velocidad del caudal en puntos localizados de la sección transversal, donde la velocidad promedio ocurra con mayor probabilidad.

En un canal, la velocidad máxima ocurre entre 0.05 y 0.25 del tirante por abajo de la superficie del agua, y la velocidad mínima se desplaza sobre las paredes del ducto donde la rugosidad tiende a frenar el avance de la corriente. La velocidad media se localiza aproximadamente a 0.60 del tirante, y puede determinarse exactamente promediando las velocidades observadas a 0.2 y 0.8 del tirante (9).

La figura 2.1 muestra la distribución típica de velocidades para un canal, la que se asemeja a círculos concéntricos con eje en el punto donde se localiza la velocidad máxima. Tal distribución sufre deformaciones debido a la geometría de la sección, rugosidad del canal y cambios de dirección (curvas, caídas, etc.).

La distribución vertical de velocidades en función de la profundidad, se asemeja a un paraboloide con foco sobre la línea donde ocurre la velocidad máxima.

En una tubería completamente llena, la máxima velocidad se desplaza por el centro del tubo y la mínima se desplaza adyacen-

te a las paredes del conducto, donde la fricción retarda el avance; la velocidad promedio se localiza a $3/8$ del diámetro alrededor del centro de la tubería, como se muestra en la figura 2.2. La velocidad promedio equivale aproximadamente a 0.80 de la velocidad máxima, este criterio práctico es aplicable a las tuberías en general, donde normalmente predomina un flujo turbulento (número de Reynolds mayor de 10 000) (8).

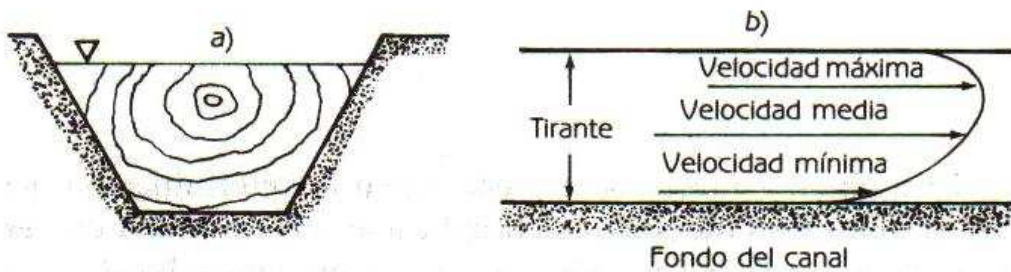


Figura 2.1. Distribución típica de velocidades de flujo en un canal. a) Sección transversal. b) Perfil.

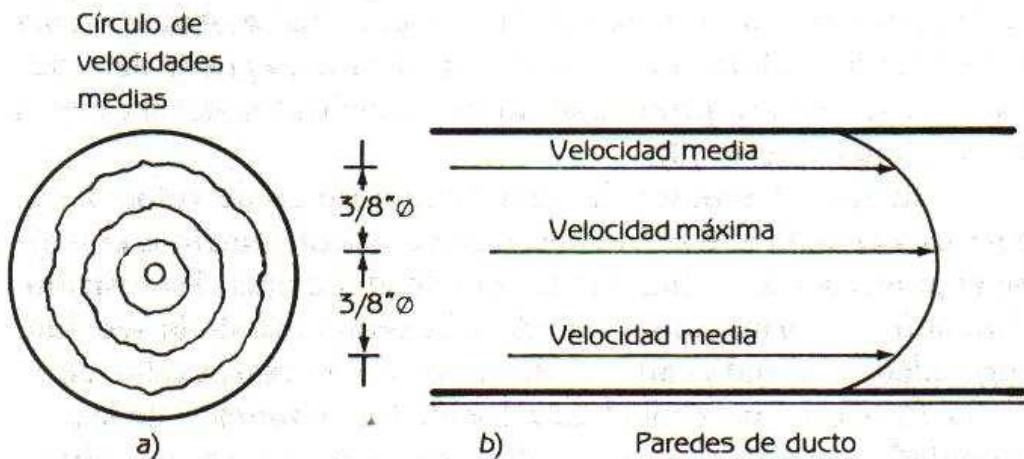


Figura 2.2. Distribución típica de las velocidades del agua dentro de una tubería recta y uniforme, operando a flujo completo. a) Sección transversal. b) Perfil.

Método del flotador

El método del flotador, al igual que los molinetes, tubos Pitot, métodos de la trayectoria y trazadores, se utiliza para medir la velocidad del caudal, no el gasto directamente. Los flotadores proporcionan una medición aproximada de la velocidad de flujo y se utilizan cuando no se requiere gran exactitud o cuando no se justifica la compra de dispositivos de aforo más precisos.

Los flotadores miden la velocidad superficial del agua y se utilizan en el aforo de surcos, acequias, canales, ríos y diques. Durante la medición, se registra el tiempo que tarda un pequeño flotador en recorrer una distancia conocida (usualmente de 10 m), marcada previamente sobre un tramo recto y uniforme. Dicho tramo es seleccionado para las observaciones a lo largo del ducto de prueba, como lo indica la figura 2.3.

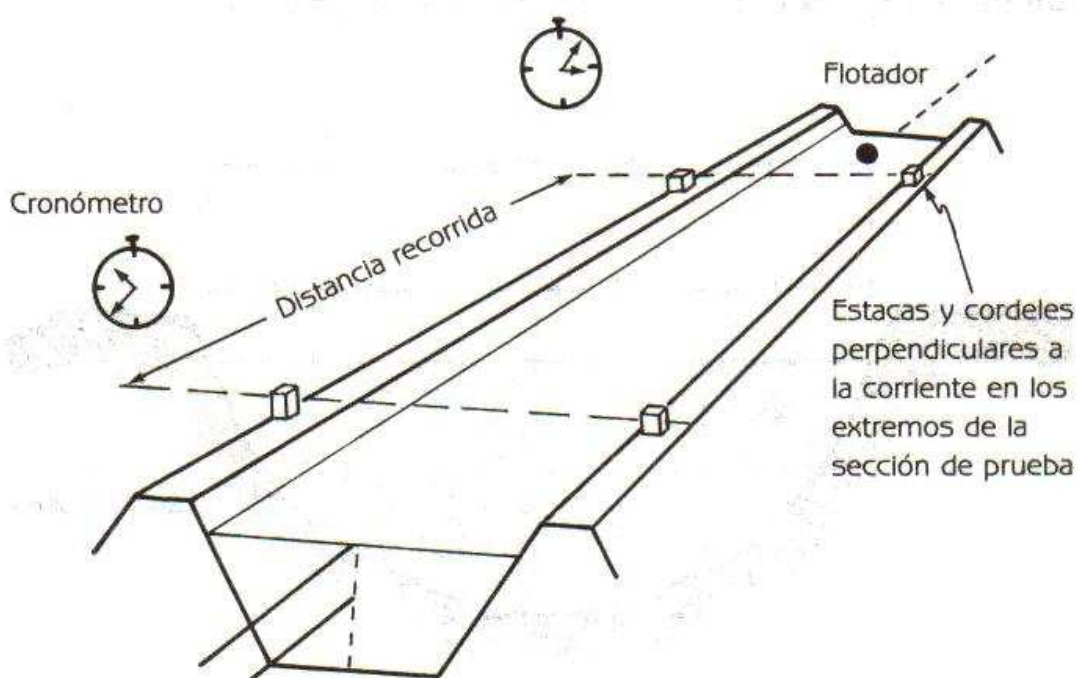


Figura 2.3. Medición de la velocidad superficial del agua con un flotador.

El flotador es soltado repetidas veces unos cuantos metros aguas arriba de la sección de prueba, cronometrando el tiempo de recorrido, para obtener un promedio. Luego, la velocidad superficial se determina dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo promedio de viaje del flotador.

Como la velocidad superficial es mayor que la velocidad promedio del caudal, es necesario corregir la medición del flotador multiplicándola por un coeficiente que varía de 0.65 a 0.80; misma que debe ser de 0.65 para pequeños caudales (acequias) y de 0.80 para grandes caudales (ríos, diques y canales).

Generalmente las acequias y canales de uso agrícola no están revestidos. Su sección transversal, construida en tierra, no es uniforme, por tanto, la determinación del área debe hacerse dividiendo el espejo del agua en varios segmentos iguales, de tal forma que se tenga una serie de figuras geométricas consistente en triángulos y trapecios, cuyos lados estarán dados por las profundidades (d_i) del agua y, las alturas, por la longitud del segmento (x/n), tal como se muestra en la figura 2.4.

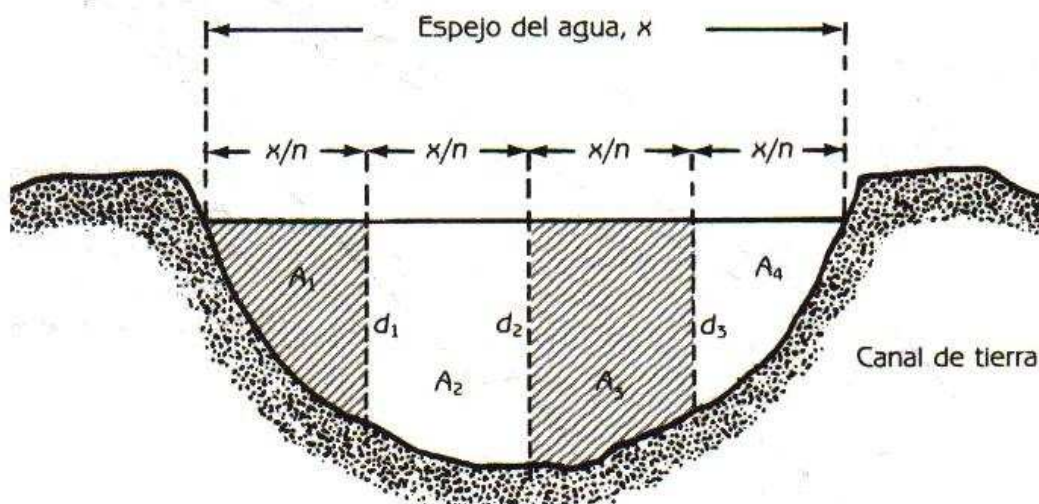


Figura 2.4. Sección transversal irregular de una corriente descompuesta en áreas parciales.

Área total,

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$$

$$A = \frac{x}{n} \frac{d_1}{2} + \frac{(d_1 + d_2)}{2} \frac{x}{n} + \frac{(d_2 + d_3)}{2} \frac{x}{n} + \frac{d_3}{2} \frac{x}{n}$$

de donde,

$A = \frac{x}{n} (d_1 + d_2 + d_3)$ y generalizando la expresión para di tirantes, tenemos que:

$$A = \frac{x}{n} \sum_{i=1}^{n-1} di \quad (\text{Ec. 1})$$

En la cual:

x = Anchura del espejo del agua.

n = Número de segmentos en que se divide el espejo.

di = Profundidad del agua o tirante y se debe observar $(n - 1)$ tirantes, para (n) segmentos en una sección.

Entre los objetos que pueden servir como buenos flotadores se encuentran una bola de caucho, un trozo de madera, un limón, una hoja seca o un envase plástico tapado.

Al multiplicar el área de la sección transversal (A) por la velocidad promedio del flujo (v), se obtiene el caudal (Q) para la corriente aforada.

En la figura 2.5 se presentan varias secciones geométricas regulares con su correspondiente fórmula para el cálculo del área. Ellas son aplicables a canales revestidos, a tuberías de drenaje parcialmente llenas y a canales contruidos con madera o con rocas.

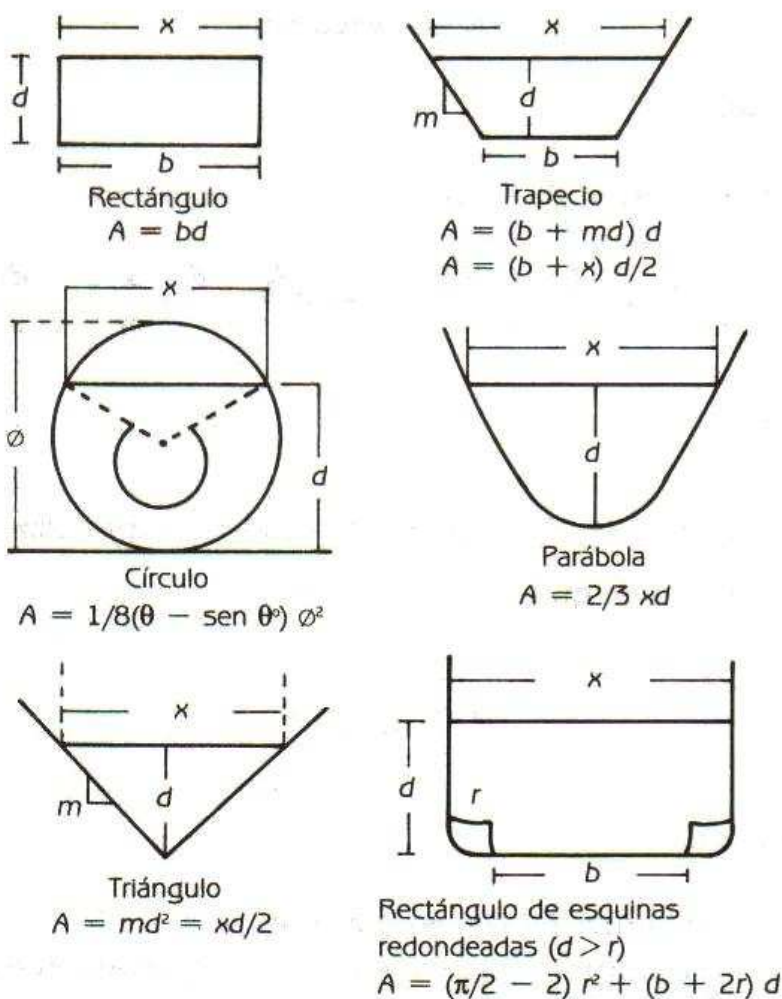


Figura 2.5. Fórmulas geométricas para calcular la superficie de varias secciones regulares.

Método del molinete hidrométrico

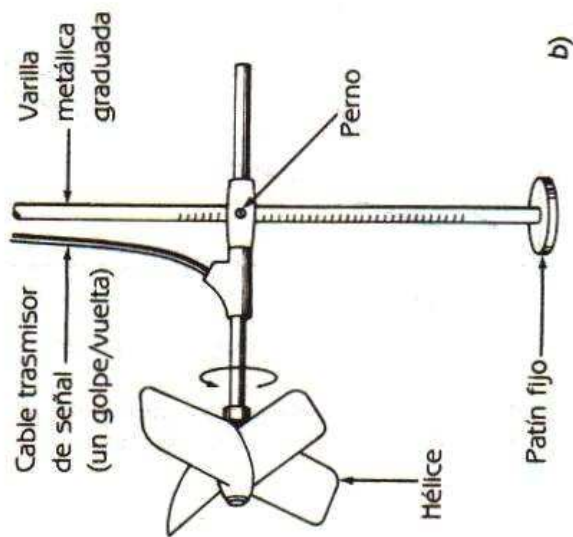
Un molinete es un pequeño instrumento constituido por una ruedecilla con aspas, la cual, al ser sumergida en una corriente gira proporcionalmente a la velocidad de la misma.

Existen dos tipos de molinetes, el de cazoletas y el de hélice (véase fig. 2.6), los cuales pueden ser montados sobre una varilla para el aforo de corrientes superficiales o suspendidos desde un cable durante el aforo de ríos y diques profundos.

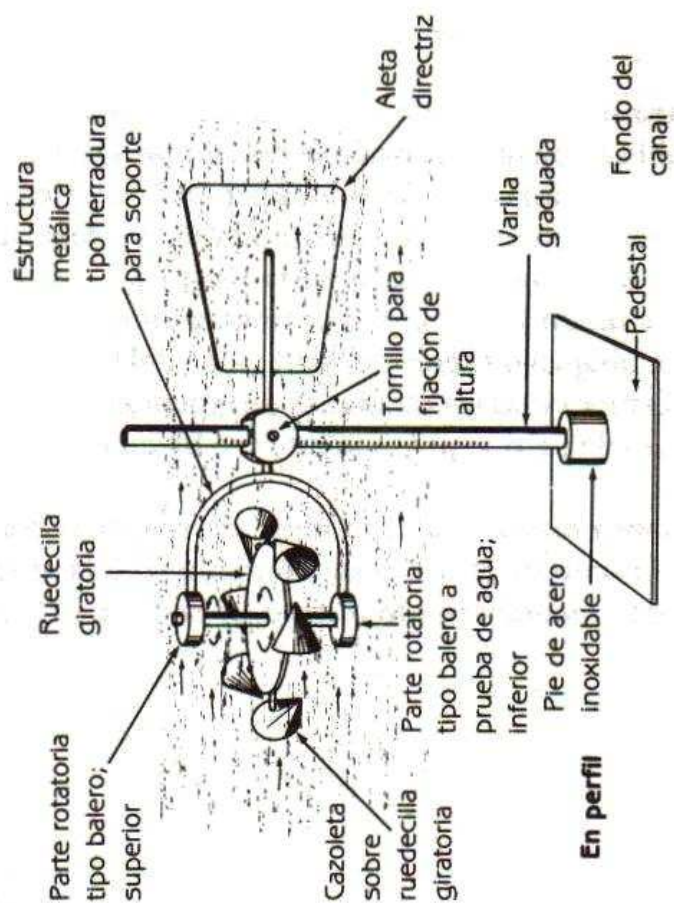


En planta

a)



b)



En perfil

Figura 2.6. Tipos de molinetes usados para el aforo de acequias, diques y canales. a) De cazoletas. b) De hélice.

Cada molinete viene calibrado de fábrica y acompañado por una tabla o ecuación, donde se relaciona la velocidad angular de la rueda giratoria con la velocidad de la corriente. La relación típica se ajusta a una recta con una ligera desviación cerca del origen, tal como se ilustra en la figura 2.7.

Para medir la velocidad de una corriente, el molinete se instala por abajo del espejo del agua, a 0.6 del tirante (medido desde la superficie) y las revoluciones de la ruedecilla se cuentan en un intervalo de tiempo previamente establecido (usualmente un minuto).

Cuanto mayor sea el número de registros realizados en un mismo punto de aforo, más confiable será la apreciación de la velocidad medida; por lo mismo, se sugiere explorar las veloci-

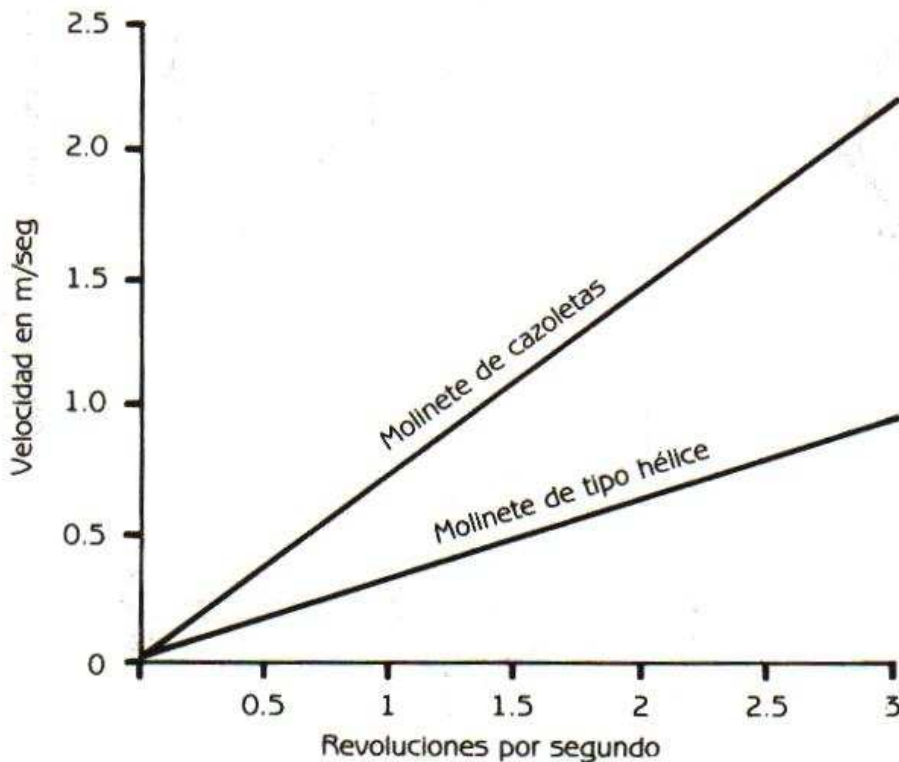


Figura 2.7. Típica relación lineal entre velocidad de la corriente y la velocidad de giro de los molinetes.

dades de la corriente en diferentes puntos igualmente espaciados sobre el espejo del agua, sumergiendo el instrumento a 0.2 y 0.8 del tirante respectivo.

En canales y acequias donde el ancho del espejo del agua sea menor de 3 m, la sección puede dividirse en tres o cuatro segmentos de igual longitud, pero en corrientes de gran anchura se acostumbra hacer las mediciones cada 3 m sobre el espejo, operando desde un puente o andamio.

Las revoluciones del impulsor, dadas por intervalo de tiempo, pueden ser contadas visualmente en una corriente superficial de agua clara y tranquila, sin embargo, en corrientes de agua turbia y caudalosa es necesario un contador eléctrico para registrarlas.

El número de revoluciones por intervalo de tiempo se transforma a velocidad de la corriente consultando la tabla del instrumento o su ecuación respectiva. En el cuadro 2.1 se proporcionan las ecuaciones de calibración para algunos molinetes, donde la ecuación reportada para el medidor Price-622 es un promedio de las graduaciones para varios molinetes y es aplicable a cualquier instrumento del mismo modelo (en buenas condiciones), dentro de un nivel de confiabilidad de 99 % (8).

Cuadro 2.1. Ecuaciones de calibración para algunos modelos de molinetes.

Modelo de molinete	Ecuación de calibración
Molinetes de cazoletas:	
Gurley-622	$v = 0.690904 \text{ rps} + 0.014694$
SIW-017	$v = 0.658 \text{ rps} + 0.0090$
Price-622	$v = 0.6735 \text{ rps} + 0.0091$
Molinete tipo hélice:	
Medidor Hoff	$v = 0.296 \text{ rps}$

El medidor Price es el molinete adoptado oficialmente por la División de Recursos Hidráulicos del Departamento de Geología de Estados Unidos de América, para el aforo de corrientes. El molinete Gurley es muy usado en los estudios hidrométricos realizados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, en México (6).

Ejemplo de aforo con molinete. Los datos tomados durante un aforo con molinete de cazoletas son procesados en este ejercicio para ilustrar la forma en que se registran y manejan. En el cuadro 2.2 se registran tales datos, seguidos por el cálculo de áreas, velocidades y gastos para la sección de prueba, cuyo croquis de campo aparece en la figura 2.8.

Cuadro 2.2. Registro de datos para un aforo con molinete y cálculo del gasto.

Lugar: _____ Fecha: _____

Datos del aforo				Cálculo del gasto		
Segmento	Tirante	6/10 d	rpm	A cm ²	v m/seg	Q l/s
0-52	18	10.8	7.5	806	0.1011	8.145
52-104	30	18.0	16.75	1508	0.2076	31.302
104-156	30	18.0	17.2	1534	0.2124	32.578
156-208	22	13.2	12.25	936	0.1558	14.578
				Gasto aforado = 86.602		

Modelo del molinete: Gurley-622

Ecuación del molinete: $v = 0.690904 \text{ rps} + 0.14694$

Propósito del aforo: Control de la lámina de irrigación

Observaciones:

Caudal conducido
en acequia de
tierra arcillosa

Aforador: _____

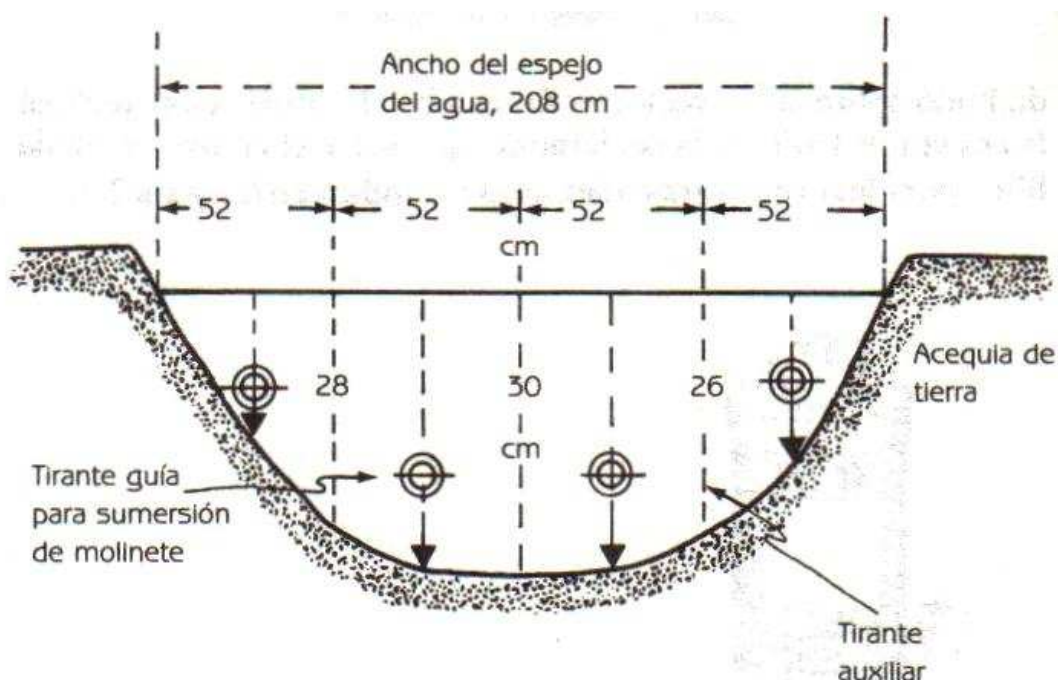


Figura 2.8. Croquis de la sección transversal de la acequia en el punto de aforo.

El molinete fue sumergido a 0.6 del tirante al centro de cada segmento y los tirantes auxiliares acotados en el croquis; se utilizaron sólo para determinar la superficie con mayor precisión. En cada instalación del molinete se hicieron tres repeticiones del registro de las revoluciones por minuto (rpm), y se reportó el promedio.

Aforo de la descarga libre en tuberías, por el método de la trayectoria

La descarga libre de una tubería horizontal o inclinada, fluendo, llena o parcialmente llena, puede ser conocida aplicando el método de la trayectoria, basado en el principio físico de la caída libre de los cuerpos. Dicho principio establece que la proyección horizontal (x) del chorro es proporcional a la velocidad de salida (v) y al tiempo (t) que tarda el agua en alcanzar un punto

definido sobre su trayectoria. En cambio la proyección vertical (y) es el resultado de la aceleración que sufre el chorro en caída libre, por efecto de la gravedad, como se indica en la figura 2.9.

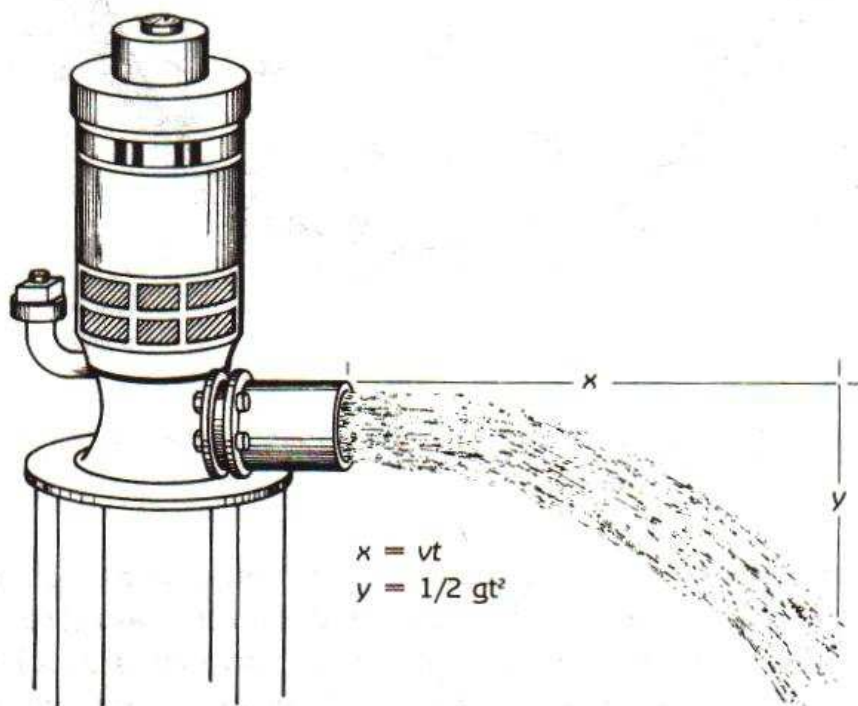


Figura 2.9. Método de la trayectoria aplicado en el aforo de bombas con tubo a descarga libre. Las proyecciones x y y deben ser medidas como lo muestra la figura.

Despreciando la resistencia ofrecida por el aire, la velocidad de salida está dada por:

$$v = x/t$$

donde el tiempo, expresado en función de la proyección vertical, será equivalente a:

$$t = \sqrt{2y/g}$$

y al sustituir esta expresión en la anterior, se llega a la siguiente ecuación para el cálculo de la velocidad de flujo que involucra las proyecciones x y y :

$$v = x/\sqrt{2y/g} = 2.215 x/\sqrt{y} \quad (\text{Ec. 2})$$

Luego, para conocer el gasto descargado (Q), se multiplica la velocidad de salida por el área transversal de la tubería, perpendicular a la dirección de flujo, siguiendo el procedimiento de cálculo indicado a continuación:

$$Q = Av = 1/4 \pi \phi^2 (2.215 x/\sqrt{y}) = k_1 \phi^2 x/\sqrt{y} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Q = Gasto aforado en (ℓ/s.)

K_1 = Constante igual a 1739.4 para obtener el gasto descargado en ℓ/s, manejando ϕ , x y y en metros.

ϕ = Diámetro interno de la tubería, a flujo completo.

En la práctica, generalmente se mide el diámetro de la tubería en pulgadas y las proyecciones x y y en centímetros; se requiere, para este caso, una modificación en la ecuación de gasto por la incorporación de un factor de conversión de unidades, como se muestra enseguida:

$$Q = K_2 \phi^2 x/\sqrt{y} = K_1 10^{-3}/15.5 \phi^2 x/\sqrt{y}$$

O sea que:

$$Q = \phi^2 x/8.911\sqrt{y} \quad (\text{Ec. 4})$$

Cuando la descarga de la tubería es parcial, la velocidad del chorro se sigue calculando a partir de las proyecciones x y y , de acuerdo con la expresión $v = x/\sqrt{2y/g}$; pero el área parcial-

mente ocupada por la vena líquida, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$A_p = 1/8 (\theta - \text{sen } \theta^\circ) \varnothing^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

A_p = Área parcialmente ocupada por la descarga de la tubería.

θ y θ° = Ángulo formado en el centro de la tubería con respecto a los límites del espejo del agua, contacto con las paredes internas del ducto; medido en radianes y grados, respectivamente.

Para calcular el ángulo θ se debe medir el borde libre (b) por encima del espejo del agua, luego se debe establecer un par de triángulos con hipotenusa igual al radio interno de la tubería (r), y cateto adyacente ($r-b$) conocido, cuya relación trigonométrica proporciona la función coseno del ángulo; equivalente a la mitad del arco $360^\circ - \theta$, como se muestra en la figura 2.10.

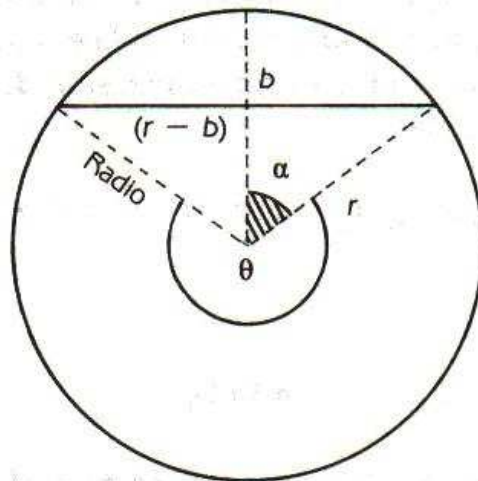


Figura 2.10. Trazo auxiliar sobre la circunferencia de una tubería parcialmente llena para calcular el ángulo θ .

La circunferencia completa de la tubería tiene $360^\circ = \theta^\circ + 2\alpha = 2\pi$ radianes, de donde $\theta^\circ = 360^\circ - 2\alpha$, estando el ángulo α en función del coseno definido por el triángulo rectángulo de hipotenusa r y cateto $(r-b)$, de acuerdo con:

$$\cos \alpha = \frac{r - b}{r} \quad (\text{Ec. 6})$$

lo cual implica que $\alpha = \arccos \alpha$, y por tanto:

$$\theta^\circ = 360^\circ - 2 \arccos \alpha \quad (\text{Ec. 7})$$

Ejemplo de aforo por el método de la trayectoria. La secuencia de cálculos desarrollados durante la determinación del gasto por el método de trayectoria, es mostrada paso a paso en el siguiente ejercicio, donde se determina el gasto descargado por una tubería de 8" (in) \varnothing , parcialmente llena, con 3" de borde libre y con proyecciones $x = 60$ cm y $y = 50$ cm sobre la trayectoria del chorro.

Para esta tubería parcialmente llena, primero se determina la velocidad de flujo, aplicando la ecuación 4, esto es:

$$v = 2.215 x / \sqrt{y} = 2.215 (0.60) / \sqrt{0.50} = 1.88 \text{ m/seg}$$

Luego se calculan los ángulos α y θ , usando las ecuaciones 8 y 9, respectivamente; para pasar enseguida al cálculo del área parcial (A_p), ocupada por el chorro, aplicando la ecuación 7; o sea:

$$\text{Coseno } \alpha = \frac{r - b}{r} = \frac{4 - 3}{4} = 0.2500, \text{ y}$$

$$\arccos \alpha = 75.5^\circ;$$

$$2\alpha = 151^\circ, \text{ lo que implica un ángulo}$$

$$\theta = 360^\circ - 151^\circ = 209^\circ = 3.65 \text{ radianes,}$$

de donde:

$$A_p = 1/8 (\theta - \text{sen } \theta^\circ) \phi^2$$

o sea,

$$A_p = 1/8 (3.64695 + 0.48412) 20.32^2;$$

por tanto,

$$A_p = 213.2 \text{ cm}^2 = 213.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Después de conocer el área parcial, ésta se multiplica por la velocidad de flujo para obtener el gasto descargado por el tubo, que para este caso resulta de:

$$\begin{aligned} Q_p &= A_p v = 1.88 \times 213.2 \times 10^{-4} \\ &= 0.04007 \text{ m}^3/\text{seg} \end{aligned}$$

esto es,

$$Q_p = 40.07 \text{ l/s}$$

Otro procedimiento que puede ser empleado, consiste en determinar primero el gasto, como si la tubería descargara a flujo completo y luego multiplicar el gasto, así obtenido, por la proporción de área ocupada por el chorro; esto es:

$$\begin{aligned} Q_p &= Q (A_p/A), \text{ lo que implica que} \\ Q_p &= \phi^2 x / 8.911 \sqrt{y} (A_p/A) \quad \text{por la ecuación 4} \end{aligned}$$

De donde:

$$Q_p = 64(60)/8.911 \sqrt{50} \quad (213.2/324.3),$$

o sea,

$$Q_p = 60.942(0.657) = 40.07 \text{ l/s}$$

La fracción de área (A_p/A) para una tubería parcialmente llena, puede, en consecuencia, determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{A_p}{A} = \frac{\theta - \text{sen } \theta^\circ}{2\pi} \quad (\text{Ec. 8})$$

Método del tubo Pitot

Un tubo Pitot es un pequeño tubo acodado en forma de "L", con ambos extremos abiertos, usado principalmente para medir la velocidad del agua en tuberías. Cuando el tubo es sumergido en un caudal, con el extremo inferior encarando a la corriente y el otro extremo abierto a la atmósfera, una pequeña columna de agua se eleva dentro del tubo, por encima de la superficie del agua; la altura de dicha columna es equivalente a la carga por velocidad, o sea, $v^2/2g$.

Un solo tubo no permite una apreciación exacta de la altura de la columna de agua, por lo cual se combinan dos tubos, como se muestra en la figura 2.11, proyectando el extremo acodado de uno de ellos en dirección aguas arriba, mientras el otro se proyecta aguas abajo. La diferencia de altura entre ambas columnas ($h_1 - h_2$) es igual a dos veces la carga por velocidad o, v^2/g ; como se demuestra a continuación.

En la figura 2.11 se tiene:

h_1 = Carga por presión + carga por velocidad.

h_2 = Carga por presión - carga por velocidad, cuya diferencia es igual a:

$$h_1 - h_2 = 0 + 2 \frac{v^2}{2g}$$

lo cual implica que:

$$h = h_1 - h_2 = \frac{2v^2}{2g} = \frac{v^2}{g}$$

de donde la velocidad de flujo

$$v = c \sqrt{gh} \quad (\text{Ec. 9})$$

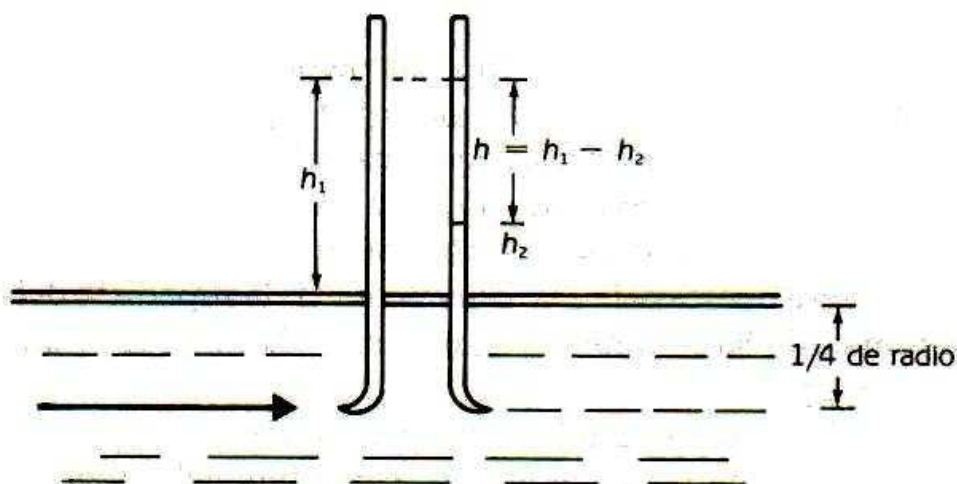


Figura 2.11. Instalación de los tubos Pitot a 1/4 de radio de la tubería para medir la velocidad promedio de flujo.

Ya que la mayoría de los tubos Pitot miden la velocidad solamente en un punto de la sección transversal de la tubería, se debe aplicar algún procedimiento para obtener la velocidad media, y de allí el gasto.

El método más simple, pero menos seguro, es colocar el tubo Pitot en el centro de la tubería, donde la velocidad es máxima, y aplicar un coeficiente para obtener la velocidad media. Pero,

debido a que la relación entre velocidad máxima y media es afectada por muchos factores, no es posible obtener mediciones precisas con este método, a ello se agrega la incertidumbre en la extrapolación de los coeficientes, los cuales varían con la construcción y diseño de los tubos.

Puede obtenerse mayor exactitud tomando la velocidad en dos puntos, uno a cada lado del centro de la tubería, en posiciones donde la velocidad sea aproximadamente igual a la velocidad media. Estos dos puntos se localizan a $3/8$ del diámetro interno, por encima y por abajo del centro de la tubería, o sea a $1/4$ del radio del ducto (8, 15).

En el comercio se encuentran varios tipos de tubos Pitot aceptables para la medición de la descarga en bombas para irrigación, entre ellos el medidor Collins y el medidor Cox, los cuales se muestran en la figura 2.12.

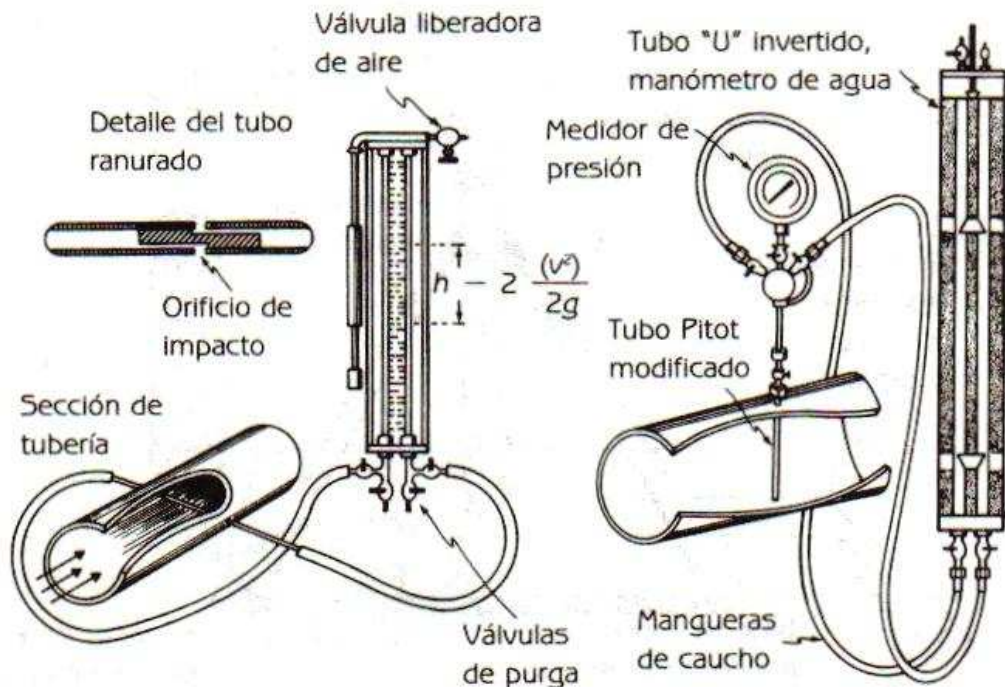


Figura 2.12. Tipos de tubos Pitot: el medidor Collins (izquierda), usado para medir la descarga en plantas de bombeo, y el medidor Cox (derecha), que permite una lectura de velocidad con una simple medición.

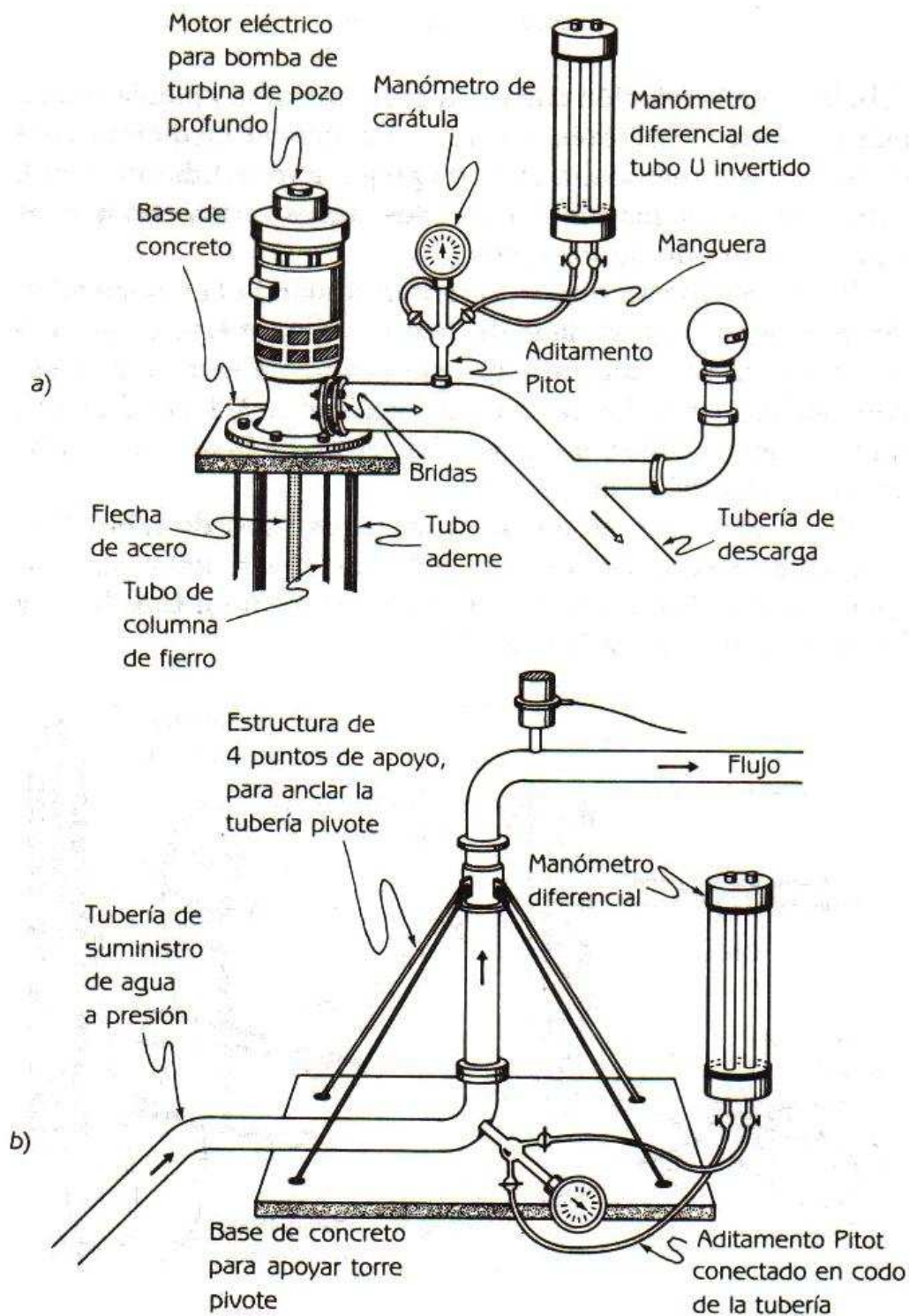


Figura 2.13. Dos formas de instalar un medidor Pitot: a) cerca de una bomba, y b) sobre el codo de la tubería de suministro de un pivote central.

El medidor Collins consiste en un tubo de impacto provisto de un manómetro de agua y aire. El medidor Cox está diseñado para integrar las velocidades a través de la tubería mediante un tubo transversal con una serie de orificios, además de un manómetro agua-aire especial.

La exactitud de cualquier tubo Pitot dependerá de: *a)* la exactitud de la calibración del instrumento, *b)* del número de puntos explorados durante la medición y *c)* de la precisión con la cual las lecturas sean tomadas.

Pruebas conducidas en la Universidad de Davis, California y en la Universidad de Dakota del Sur (14, 15), por diferentes investigadores, bajo condiciones desfavorables de flujo, tales como cerca de un codo, válvula compuerta o bomba, han demostrado que los mejores resultados pueden ser obtenidos con el medidor Cox. En la figura 2.13 se muestran dos formas de instalar un medidor Cox, la primera cerca de una bomba de turbina y la segunda en el codo de la tubería de suministro, de un pivote central, ambas mediciones tomadas donde no había suficiente espacio para la instalación de un medidor de hélice. En sistemas de pivote central, los tubos Pitot pueden también ser instalados en el hueco del primer aspersor.



Métodos que
utilizan
contracciones

Dentro de este grupo, las toberas, los diafragmas y los medidores Venturi se utilizan para el aforo del agua conducida a presión por tuberías, mientras que los vertederos, orificios y canaletas Parshall se emplean para la medición del agua en acequias, canales y ductos abiertos.

Medidores Venturi

El principio del medidor Venturi, basado en el teorema de energía de Bernoulli, fue establecido en 1797, por el italiano J. B. Venturi, pero su aplicación práctica se debe al estadounidense Clemens Herschel, quien lo utilizó por vez primera en 1887 para la medición del gasto en tuberías (8, 9, 11).

Como se puede apreciar en la figura 3.1, un medidor Venturi se compone de tres partes: 1. El cono de entrada, donde el diámetro de la tubería se reduce gradualmente. 2. La sección contraída o garganta. 3. El cono de salida o difusor, donde el diámetro aumenta gradualmente hasta igualar el diámetro de la tubería aforada.

En el cono de entrada, el caudal, normalmente conducido a baja velocidad y alta presión, es acelerado gradualmente y parte de su energía de presión cambia a energía cinética, llegando a la garganta con una condición hidráulica de alta velocidad y baja

presión. La caída de presión, o pérdida de carga piezométrica entre la tubería de entrada y la sección contraída de la garganta, es medida en un manómetro diferencial.

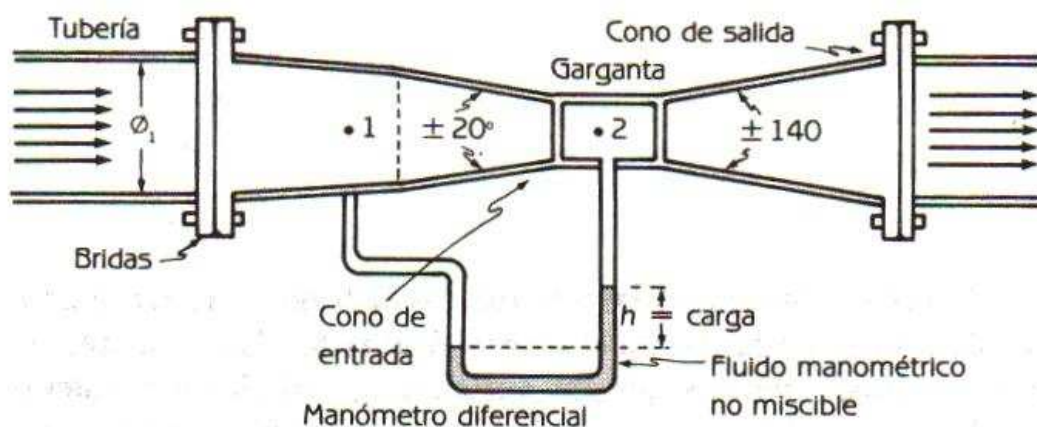


Figura 3.1. Típico medidor Venturi, utilizado para la medición del caudal en tuberías.

La función del cono de salida es desacelerar suavemente al fluido y llevar la presión tan cerca como sea posible de su valor de entrada. Esta retransformación de energía nunca se logra completamente, debido a la inevitable pérdida de carga por fricción que siempre ocurre cuando el fluido pasa a través de un Venturi.

La recuperación de la carga piezométrica varía de 80 a 90 %, o sea que la pérdida por fricción es del orden de 10 a 20 %, pero este porcentaje disminuye con el tamaño del medidor y con el incremento en velocidad.

Los Venturi generalmente son piezas metálicas de fundición con garganta y cono de entrada, rectificadas a máquina, de acabado liso en latón o bronce y bridas en los extremos para atornillar en la tubería.

Los Venturi muy pequeños, para tuberías menores de 5 cm de diámetro, se fabrican de latón, bronce o cloruro de polivinilo (PVC), mientras que los Venturi muy grandes, de hasta 6 m, se

construyen de concreto, con pared afinada y garganta metálica torneada a máquina (8).

Los medidores Venturi deben instalarse sobre una tubería recta, mínimo a 10 diámetros de distancia aguas abajo de cualquier codo o válvula, esto con el fin de evitar que la turbulencia de la corriente, o los remolinos, alteren la lectura del manómetro (10). Cuando no es posible proporcionar una longitud de tubería suficiente, la corriente debe uniformizarse mediante paletas directrices; una cruz de lámina metálica, de 1 o 2 diámetros de longitud, insertada en la tubería, justamente antes del Venturi, sirve para dicho propósito (8).

Ecuación de descarga para un Venturi. El teorema de energía demuestra que en un Venturi, la caída del gradiente hidráulico o del nivel piezométrico, es equivalente al incremento en energía cinética, más la fricción que ocurre entre la entrada y la garganta del medidor:

$$\frac{P_1 - P_2}{w} + (Z_1 - Z_2) = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \text{fricción}$$

Donde:

$\frac{P_1 - P_2}{w}$ = Diferencia de cargas por presión entre un punto 1 a la entrada y un punto 2 en la garganta del medidor ($P_1 > P_2$), puntos que coinciden con las conexiones de un manómetro en el Venturi, como se ilustra en la figura 3.1.

$Z_1 - Z_2$ = Diferencia de elevación (ΔZ) o de cargas por posición entre los puntos 1 y 2 antes señalados ($Z_1 = Z_2$ en Venturi horizontales, $Z_1 > Z_2$ en Venturi verticales o inclinados con flujo descendente y $Z_1 < Z_2$ en Venturi verticales o inclinados, con flujo ascendente).

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \text{Diferencia en cargas por velocidad o incremento en energía cinética entre la entrada y la garganta del medidor } (V_2 > V_1).$$

La ecuación del manómetro diferencial escrita paso a paso entre los puntos 1 y 2 indica, que la caída del nivel piezométrico es igual a la lectura manométrica multiplicada por la diferencia de peso específico de los fluidos, como se expresa a continuación:

$$\frac{P_1 - P_2}{w} - \Delta Z = h (S - 1)$$

Donde:

h = Carga registrada en el manómetro o diferencia de niveles de la columna en "U", conteniendo un líquido manométrico tal como mercurio, aceite, disulfuro de carbono, tetracloruro de carbono, bromoformo o alcohol de peso específico conocido no mezclables en agua.

ΔZ = Diferencia de elevación entre los puntos 1 y 2 del manómetro conectados a la entrada y a la garganta del medidor.

S = Peso específico relativo del líquido manométrico con respecto al agua ($S > 1$).

Al combinar la ecuación de energía con la ecuación del manómetro diferencial, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = h (S - 1) \quad (\text{Ec. 1})$$

La cual indica que, para una misma descarga, el aumento en la energía cinética y la disminución en la energía potencial

deben permanecer invariables, cualquiera que sea la posición del medidor (g).

La velocidad V_2 del agua al pasar por la sección contraída de la garganta, es mayor que la velocidad V_1 en la entrada del medidor; sin embargo, por la ecuación de continuidad ($Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$) se mantiene la siguiente igualdad.

$$\begin{aligned} A_1 V_1 &= A_2 V_2 \\ 1/4 \pi \phi_1^2 V_1 &= 1/4 \pi \phi_2^2 V_2 \end{aligned}$$

por tanto,

$$V_2 = (\phi_1/\phi_2)^2 V_1 \quad (\text{Ec. 2})$$

en donde:

A_1 = Área transversal de la tubería a la entrada del medidor con diámetro ϕ_1 .

A_2 = Área transversal de la sección tubular contraída de la garganta con diámetro ϕ_2 .

Y al sustituir la ecuación 2 en la 1, se obtiene la siguiente expresión para la velocidad del agua en la tubería (V_1):

$$V_1^2 (\phi_1/\phi_2)^4 - V_1^2 = 2gh (S - 1) \quad \text{resultando}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gh (S - 1)}{(\phi_1/\phi_2)^4 - 1}}$$

Por tanto, la descarga Q del medidor, con diámetros ϕ_1 y ϕ_2 conocidos, estará dada por:

$$Q = A_1 V_1 = CA_1 \sqrt{\frac{2gh (S - 1)}{(\phi_1/\phi_2)^4 - 1}} \quad (\text{Ec. 3})$$

En la ecuación 3 se ha incorporado un coeficiente de descarga (C) que varía de 0.96 a 0.98 para corregir por fricción. Para un mismo Venturi, donde la única variable es la lectura manométrica, la ecuación anterior simplemente se expresa como:

$$Q = k\sqrt{h} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$$K = CA_1 \sqrt{\frac{2g(S-1)}{(\phi_1/\phi_2)^4 - 1}}$$

o también

$$K = CA_2 \sqrt{\frac{2g(S-1)}{1 - (\phi_2/\phi_1)^4}}$$

En la ecuación 4, la constante numérica K agrupa todos los valores de la ecuación 3 con excepción de la \sqrt{h} .

En el comercio se ofrecen medidores Venturi de acero que incorporan un totalizador de flujo con precisión de $\pm 2\%$, los cuales pueden ser calibrados sin moverlos de la línea, con partes y accesorios remplazables (7), como el mostrado en la figura 3.2.

Los tamaños y capacidad de estos medidores se indican a continuación:

<i>Tamaños</i>	<i>Capacidades</i>
De 06" a 06-5/8"	13 a 054 l/s
De 08" a 08-5/8"	32 a 158 l/s
De 10" a 10-3/4"	63 a 221 l/s

El principio del Venturi en la inyección de agroquímicos. La reducción cónica de una unidad Venturi, ayuda en la inyección de fertilizantes y agroquímicos en tuberías a presión

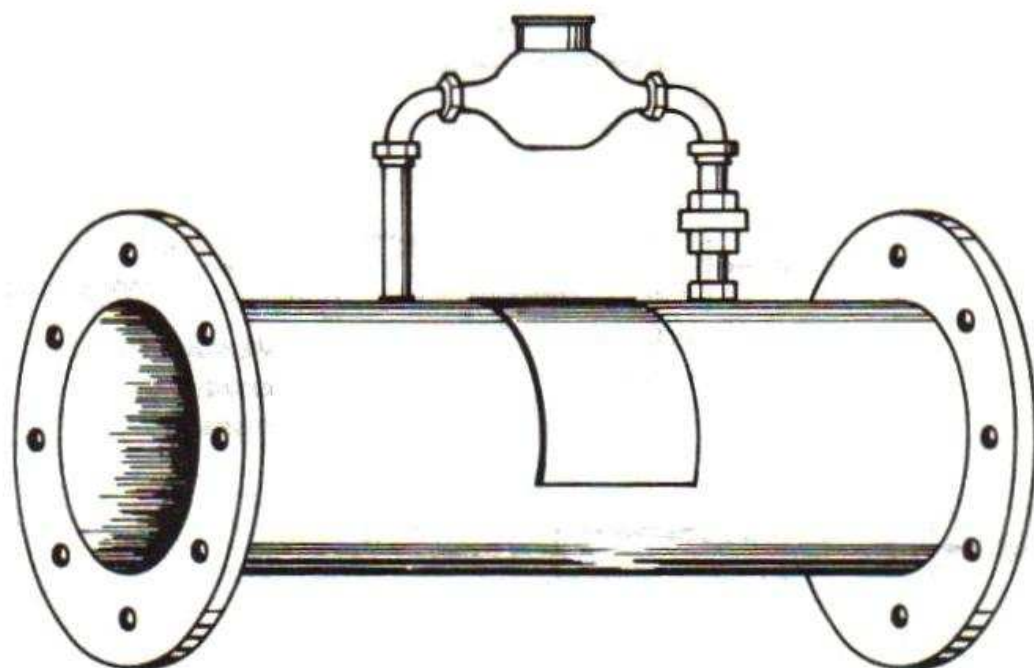


Figura 3.2. Medidor Venturi con registrador de gasto.

de sistemas de riego por aspersión y goteo. La succión de agroquímicos en solución, desde un tanque hacia el interior de la tubería, se debe a la caída de presión que sufre el agua, al pasar por la sección contraída de la garganta, donde se incrementa su velocidad (13).

Los inyectores tipo Venturi, para sistemas de riego, se fabrican en polipropileno, resistente a la corrosión química; en tamaños de 1/2" a 2" de diámetro (12 a 50 mm \varnothing), con capacidades de succión de 15 a 1500 l/h, respectivamente (12). Algunos modelos se muestran en la figura 3.3.

Ejemplo de aplicación de la ecuación del Venturi. Para la medición del agua, conducida en una tubería vertical de flujo ascendente, se instala un medidor Venturi de 8" \times 4" (203 \times 102 mm), como se muestra en la figura 3.4. El medidor tiene un coeficiente $C = 0.96$, y, al momento de aforo, el manómetro diferencial de mercurio ($S = 13.6$) marca una diferencia de niveles en la columna en "U" de 150 mm. Determínese la descarga.

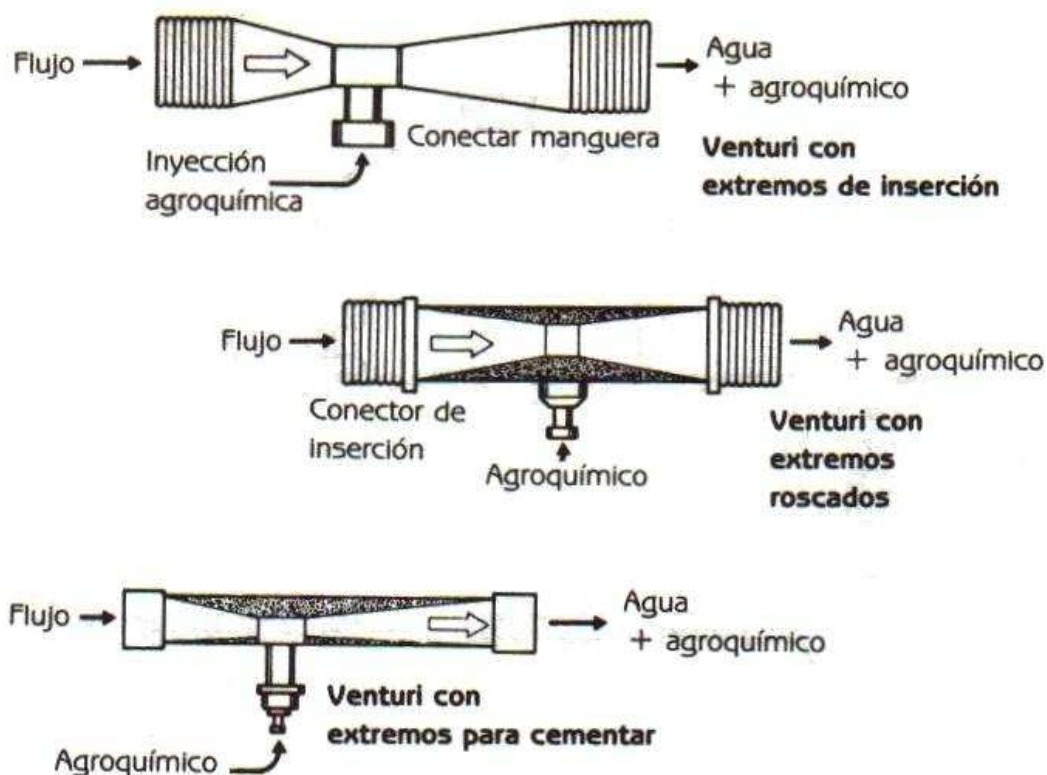


Figura 3.3. Inyectores tipo Venturi para sistemas de riego, con capacidades de succión de 15-1500 l/h en tamaño de 12-50 mm \varnothing .

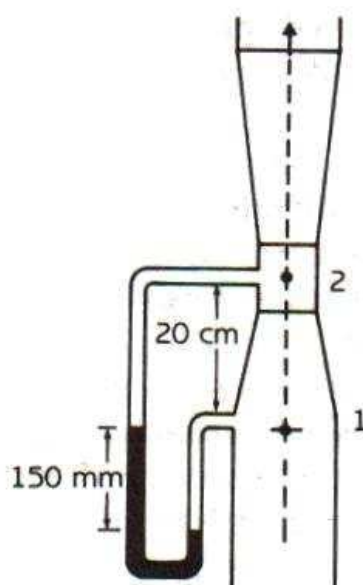


Figura 3.4. Venturi vertical con flujo ascendente.

El problema se puede resolver aplicando directamente la ecuación 4, calculando primero el valor de K con g en m/seg^2 , y los diámetros 1 y 2 en metros, para luego obtener el gasto multiplicando la constante K por \sqrt{h} , también en metros, o sea:

$$K = 0.96 (0.2032^2) \left(\frac{\pi}{4} \right) \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 12.6}{(0.2/0.1)^2 - 1}}$$

al hacer las operaciones se obtiene:

$$K = 0.1264$$

por tanto, el gasto en m^3/seg , que pasa a través del medidor, es igual a:

$$Q = K \sqrt{h} = 0.1264 \sqrt{0.15} = 0.0489 \text{ m}^3/\text{seg}, \text{ o también, } Q = 48.95 \text{ l/s.}$$

Flujo a través de orificios y compuertas

Por la simplicidad de su diseño y construcción, los orificios circulares de bordes biselados, son usados generalmente para la medición del agua en canales y tuberías, aunque también pueden emplearse orificios cuadrados y rectangulares.

La descarga de agua a través de orificios y compuertas, con la sección transversal de flujo completamente llena, está dada por la fórmula básica de gasto: $Q = AV$, donde A es el área de la abertura, corregida por la contracción que sufre el chorro al salir, y V es la velocidad de salida, expresada en función de la carga hidráulica y corregida por fricción, de tal forma que:

$$Q = AC_c V C_v$$

Donde:

- A = Área transversal del orificio.
- C_c = Coeficiente de contracción (0.614-0.617).
- V = Velocidad de la descarga.
- C_v = Coeficiente de velocidad (0.954-0.991).

De acuerdo con el teorema de Torricelli, establecido en 1644, la velocidad de salida a través de un orificio, es igual a la velocidad adquirida por un cuerpo que cae libremente desde una altura h por encima del centro de la abertura, o sea:

$$h = \frac{V^2}{2g}$$

De donde,

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

Siendo:

h = Carga que opera sobre el centro del orificio, en orificios con descarga libre o, la diferencia de elevación entre las superficies del agua medida antes y después del orificio, en orificios sumergidos; como se indica en la figura 3.5.

Al sustituir el teorema de Torricelli en la fórmula básica del gasto, se obtiene la ecuación de descarga para orificios, dada por:

$$Q = A C_c C_v \sqrt{2gh} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$Q = A C \sqrt{2gh}$$

Donde:

$C = C_c C_v$ = Coeficiente de derrame o de gasto para orificios, el cual típicamente ha variado de 0.59-

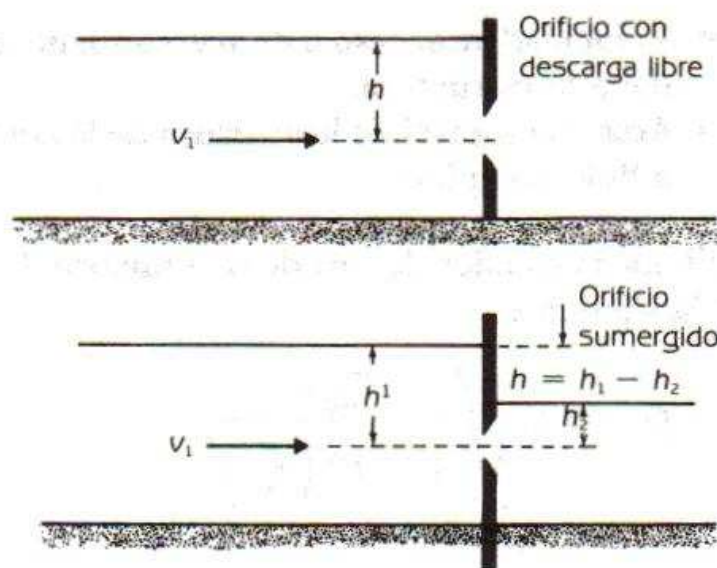


Figura 3.5. Medición de la carga en orificios.

0.65 para orificios circulares de latón con bordes biselados y velocidad de acceso despreciable.

El coeficiente C depende de la configuración del orificio, material de construcción y condiciones del flujo. Aunque tradicionalmente se ha considerado como de 0.61, debe determinarse en el lugar de la medición para cada orificio y rango de caudales, especialmente en aforos que requieren precisión (16).

En el aforo de compuertas se debe considerar la velocidad de acceso; lo mismo debe hacerse en orificios instalados en el interior de tuberías, donde la carga debe medirse con un manómetro diferencial. Para compuertas, la fórmula de aforo es:

$$Q = AC \sqrt{2g(d_1 - d_2) + V_1^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

En donde:

d_1 y d_2 = Profundidad del agua antes y después de la compuerta.

V_1 = Velocidad de acceso o de acercamiento del caudal a la estructura.

A = Área transversal de la abertura de la compuerta a flujo completo.

Para orificios instalados dentro de una tubería, la ecuación gasto es la siguiente:

$$Q = a C \sqrt{\frac{2gh}{1 - C^2 \left(\frac{a}{A}\right)^2}} \quad (\text{Ec. 7})$$

En la cual:

a = Área transversal del orificio.

A = Área transversal de la tubería.

Las ecuaciones 6 y 7 se obtienen al aplicar el teorema de energía antes y después de cada estructura. En orificios instalados al final de una tubería, como en la figura 3.6 la carga h se puede medir con un piezómetro que contenga algún líquido no miscible, más denso que el agua, o, con un manómetro de carátula, colocado como se muestra en la figura 3.6.

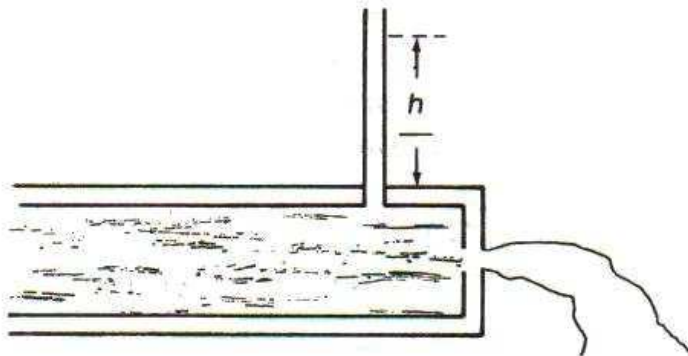


Figura 3.6. Medición de la carga en orificios al final de tuberías.

Descarga en vertederos

Un vertedero es una muesca o escotadura de forma regular, a través de la cual el agua puede fluir. Los vertederos usados para la medición del agua en canales y diques abiertos, se recortan sobre placas de metal, madera, plástico o fibra de vidrio, mientras que aquéllos utilizados para el desagüe de excedentes en canales, estanques y presas, son generalmente estructuras permanentes, construidas de concreto o mampostería.

El borde sobre el cual se vierte el agua se denomina cresta del vertedero. La lámina de agua que fluye por encima de la cresta se llama manto y la altura de agua que produce el derrame, es la carga. El canal de llegada o acceso es el que conduce hasta el vertedero y la velocidad del agua en ese canal se le denomina velocidad de acercamiento.

Los vertederos se clasifican, de acuerdo con la forma de la escotadura en rectangulares, triangulares, trapezoidales, circulares y parabólicos, siendo las tres primeras formas muy usadas en la medición del agua de riego en canales y acequias. Por el acabado de la cresta se distinguen dos tipos de vertederos, el de cresta aguda y el de cresta ancha.

El vertedero de cresta aguda tiene un borde afilado en la cara corriente arriba, con una forma tal que el agua al pasar sólo toca la línea, mientras que el vertedero de cresta ancha, tiene, ya sea un borde redondeado corriente arriba, o una cresta tan ancha que el agua, al pasar entra en contacto con una superficie. Por su mayor exactitud, el vertedero de cresta aguda es usado casi exclusivamente para la medición del agua en canales y diques (8, 9 y 15).

Vertederos rectangulares. El típico vertedero rectangular de cresta aguda mostrado en la figura 3.7, fue uno de los primeros tipos utilizados en el aforo de corrientes. Su principio hidráulico sirvió para el diseño de los otros tipos. La fórmula bási-

ca para un vertedero rectangular con velocidad de acercamiento despreciable está dada por:

$$Q = c L h^{3/2} \quad (\text{Ec. 8})$$

En donde,

Q = Gasto descargado por la escotadura en $\text{m}^3/\text{seg.}$

L = Longitud efectiva de la cresta en m.

h = Carga por velocidad en m.

c = Coeficiente experimental que engloba a las constantes numéricas y al coeficiente de fricción.

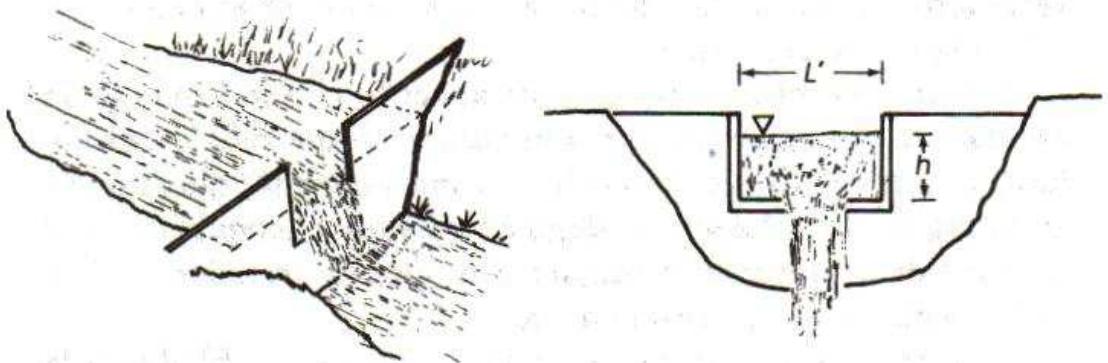


Figura 3.7. Vertedor rectangular de cresta aguda con contracciones laterales.

Las contracciones laterales reducen la longitud efectiva de la cresta. A través de la experimentación, Francis (8) en Lowell, Mass., determinó en 1852 que:

$$L = L' - 0.1 nh$$

En cuya expresión

L' = Longitud real de la cresta en m.

n = Número de contracciones en el vertedero.

En los experimentos de Francis se probaron cargas de 0.18 a 0.49 m, longitudes de vertedero de 2.40 a 3.00 m y velocidades de acceso de 0.06 a 0.30 m/seg, y se encontró un coeficiente $C = 1.84$. Los posteriores experimentos conducidos en Europa por Bazin, Frese y Rehbock en 1886, 1890 y 1912, respectivamente, aunque no coincidieron totalmente con los resultados de Francis, reportaron coeficientes muy cercanos, en el rango de 1.80-2.20; lo cual fue verificado por King (9).

Vertederos triangulares. El vertedero triangular o de escotadura en "V", es apropiado para la medición de pequeños caudales, es fácil de construir e instalar y, desde el punto de vista práctico, está bien adaptado para el aforo de gastos menores de 120 l/s. La fórmula básica para el derrame de un vertedero triangular, despreciando la velocidad de llegada, está dada por:

$$Q = c' \tan \frac{\theta}{2} h^{2.5} \quad (\text{Ec. 9})$$

en la cual,

c' = Coeficiente que corrige por pérdidas de energía y ajusta unidades métricas.

θ = Ángulo que se tiene en el vértice de la escotadura en "V", como se muestra en la figura 3.8.

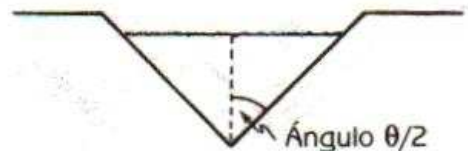
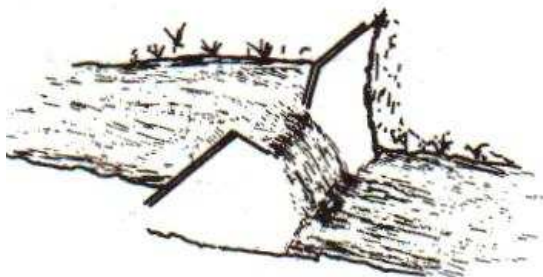


Figura 3.8. Vertedero triangular.

Los resultados experimentales, obtenidos en la Universidad de Michigan, para vertederos triangulares con diferente ángulo de escotadura y cargas de 0.06-0.54 m, fueron analizados por King (8), quien encontró un valor general para c' de aproximadamente 1.38.

Vertederos trapeziales. La descarga en un vertedero trapezoidal es igual a la suma de los gastos dados por un vertedero rectangular y uno triangular. Un vertedero trapezoidal muy usado en la medición del agua de riego, es el Cipolletti, mostrado en la figura 3.9; tiene 1/4 de pendiente en los costados, aproximadamente la necesaria para obtener un derrame a través de la porción triangular que compense la disminución de gasto ocasionado por las contracciones laterales.

La fórmula para un vertedero Cipolletti, dada a continuación, es muy parecida a la usada para vertederos rectangulares de cresta aguda, lo cual constituye una ventaja, pues no requiere de corrección por contracciones laterales. El vertedero Cipolletti no es recomendable en mediciones de precisión.

$$Q = 1.859 L h^{1.5} \quad (\text{Ec. 10})$$

En la cual:

L = Longitud real de la cresta en m.

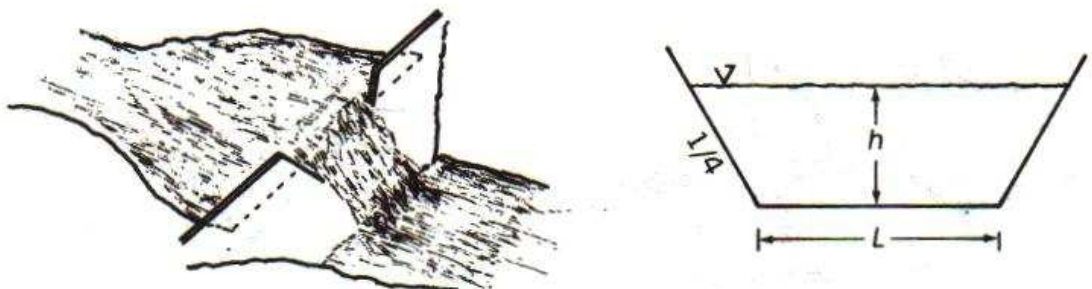


Figura 3.9. Vertedero trapezoidal Cipolletti.

Instalación de un vertedero. Bajo la mayoría de las condiciones de campo se puede esperar una precisión de 85 a 95 % cuando un vertedero está apropiadamente construido e instalado, para lo cual se deben seguir las siguientes instrucciones:

- a) Construya la cresta y los lados de la escotadura del vertedero de un espesor no mayor de 1/8" (3 mm de espesor o menos).
- b) Diseñe la estructura para la carga máxima esperada en la corriente por aforar; el vertedero puede ser de madera con escotadura metálica biselada. La máxima carga no será mayor que un tercio de la longitud de cresta.
- c) Coloque el vertedero transversal a la corriente, sobre un tramo recto y uniforme de canal, procurando que la distancia aguas arriba del vertedero sea, por lo menos, igual a diez veces la longitud de cresta.
- d) Evite obstrucciones en el lado aguas arriba del vertedero y asegure que la cresta esté recta y a nivel.
- e) En lo posible, instale el vertedero en el extremo final de un dique largo, suficientemente ancho y profundo, de tal forma que el agua se aproxime al vertedero libre de remolinos, a una velocidad no mayor de 0.15 m/seg.

La altura de la cresta del vertedero por encima del fondo del canal, debería ser aproximadamente igual a dos veces y, preferentemente, tres veces la carga de agua.

La distancia entre los lados de la muesca del vertedero y las paredes del canal no debe ser menor que dos veces la carga, excepto para vertederos suprimidos.

Medición de la carga sobre un vertedero. La carga o espesor de la lámina de agua que pasa sobre la cresta del vertedero, debe medirse aguas arriba del punto de instalación, donde la caída del manto no afecte la medición. Para esto se clava una estaca aguas arriba del vertedero a una distancia mínima de seis veces la carga máxima esperada.

Enseguida se nivela la cabeza de la estaca con frecuencia a la cresta del vertedero; se mide la carga midiendo la altura del agua por encima de la cabeza de la estaca, para lo cual se utiliza una escala o un medidor de gancho, como se indica en la figura 3.10. Un escalímetro permite lecturas directas de carga, pero mayor exactitud se obtiene con un medidor de gancho y un pozo de calma.

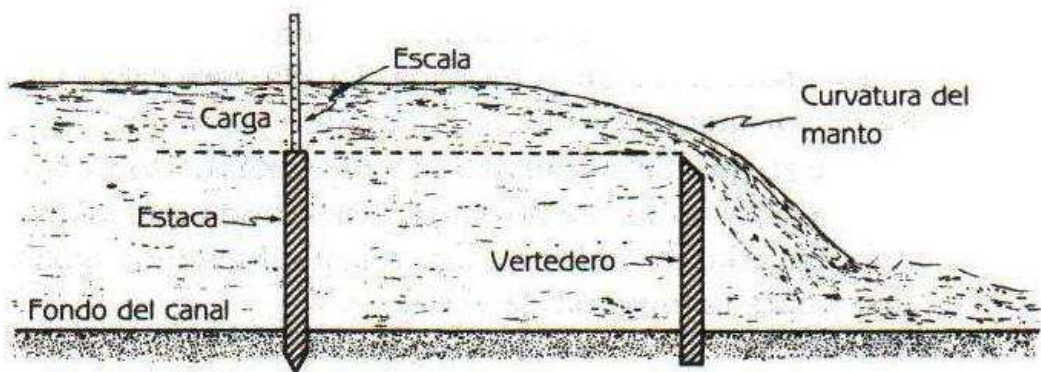


Figura 3.10. Medición de la carga sobre un vertedero.

Canaleta de medición Parshall

Principio de diseño e historia. El aforo con vertederos es sumamente simple, pero se genera una pérdida de carga relativamente alta. Además, si el agua contiene partículas suspendidas, éstas serán depositadas en el embalse aguas arriba (o remanso) formado por el vertedero, modificando gradualmente el coeficiente de descarga.

Estas dificultades pueden ser solucionadas, al menos parcialmente, con una canaleta de flujo crítico, diseñada con base en el principio del medidor Venturi.

Los primeros experimentos con canaletas de flujo crítico fueron desarrollados por V. M. Cone, en 1917. Fort Collins (Colorado), diseñó un dispositivo de aforo llamado canaleta Venturi.

Posteriormente, en 1921, R. L. Parshall continuó estas investigaciones y en 1926 mejoró la canaleta Venturi, la cual, en 1929, fue denominada "canaleta de medición Parshall" por el Comité Ejecutivo de la División de Irrigación de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles. Después de 1929 su uso se ha generalizado en el aforo del agua de riego en canales y diques, según consta en los reportes publicados por R. L. Parshall que datan de 1932, 1936, 1941 y 1950; y ha dado origen al diseño de estructuras similares en Inglaterra, Suiza, Italia, India y Argentina (3).

La canaleta Parshall usualmente es operada bajo condiciones de flujo libre o no sumergida y el tirante crítico ocurre en la sección contraída (garganta), y un salto hidráulico en la sección divergente a la salida. Sin embargo, en algunas ocasiones el salto puede estar sumergido.

Descripción de la canaleta Parshall. El piso de la sección aguas arriba está a nivel y las paredes convergen hacia la garganta. Las paredes de la garganta son paralelas y el piso está inclinado hacia abajo. Las paredes de la sección aguas abajo divergen hacia la salida y el piso tiene una inclinación ascendente, lo cual se puede apreciar en la figura 3.11.

En dicha figura las letras indican las siguientes dimensiones de la estructura.

W = Tamaño de la garganta.

A = Longitud de la pared lateral de la sección convergente.

$2/3 A$ = Distancia desde el extremo final de la cresta al punto de medición.

B = Longitud axial de la sección convergente.

C = Anchura del extremo aguas abajo de la canaleta a la salida de la sección divergente.

D = Anchura del extremo aguas arriba de la canaleta a la entrada de la sección convergente.

E = Profundidad de la canaleta.

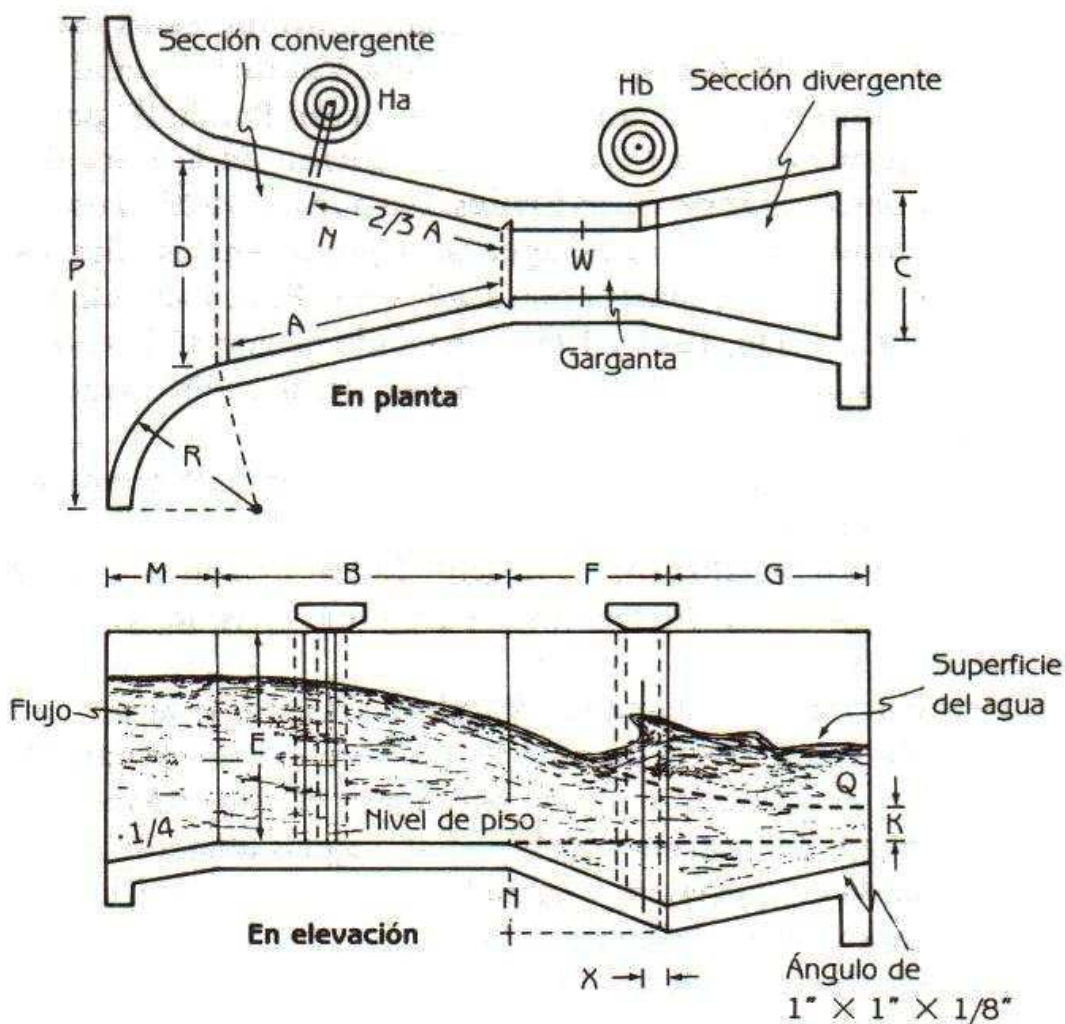


Figura 3.11. Canaleta de medición Parshall en planta y elevación, mostrando sus dimensiones con letras.

- F = Longitud de garganta.
- G = Longitud de la sección divergente.
- K = Diferencia de elevación entre el extremo más bajo de la canaleta y la cresta.
- M = Longitud del piso de llegada o acceso.
- N = Profundidad de la depresión en la garganta, por abajo de la cresta.

Cuadro 3.1. Dimensiones y capacidades para las canaletas de medición Parshall en varios tamaños de garganta (las letras se refieren a las dimensiones indicadas en la figura 3.11).

W	A		$\frac{2}{3}A$		B		C		D		E		F		G		K	N	R	M	P		X	Y	Descarga			
	ft	in	ft	in	ft	in	ft	in	ft	in	ft	in	ft	in	ft	in	in	in	ft	in	ft	in	in	in	cfs	Libre		
																											Mín.	Máx.
0 3	1	6 $\frac{3}{8}$	1	$\frac{1}{4}$	1	6	0	7	0	10 $\frac{3}{16}$	2	0	0	6	1	0	1	2 $\frac{1}{4}$	1	4	1	0	2	6 $\frac{1}{4}$	1	1 $\frac{1}{2}$	0.03	1.9
0 6	2	7 $\frac{1}{16}$	1	4 $\frac{5}{16}$	2	0	1	3 $\frac{1}{2}$	1	3 $\frac{5}{8}$	2	0	1	0	2	0	3	4 $\frac{1}{2}$	1	4	1	0	2	11 $\frac{1}{2}$	2	3	0.05	3.9
0 9	2	10 $\frac{5}{8}$	1	11 $\frac{1}{8}$	2	10	1	3	1	10 $\frac{5}{8}$	2	6	1	0	1	6	3	4 $\frac{1}{2}$	1	4	1	0	3	6 $\frac{1}{2}$	2	3	0.09	8.9
1 0	4	6	3	0	4	4 $\frac{7}{8}$	2	0	2	9 $\frac{1}{4}$	3	0	2	0	3	0	3	9	1	8	1	3	4	10 $\frac{3}{4}$	2	3	0.11	16.1
1 6	4	9	3	2	4	7 $\frac{7}{8}$	2	6	3	4 $\frac{3}{8}$	3	0	2	0	3	0	3	9	1	8	1	3	5	6	2	3	0.15	24.6
2 0	5	0	3	4	4	10 $\frac{7}{8}$	3	0	3	11 $\frac{1}{2}$	3	0	2	0	3	0	3	9	1	8	1	3	6	1	2	3	0.42	33.1
3 0	5	6	3	8	5	4 $\frac{3}{4}$	4	0	5	1 $\frac{7}{8}$	3	0	2	0	3	0	3	9	1	8	1	3	7	3 $\frac{1}{2}$	2	3	0.61	50.4
4 0	6	0	4	0	5	10 $\frac{5}{8}$	5	0	6	4 $\frac{1}{4}$	3	0	2	0	3	0	3	9	2	0	1	6	8	10 $\frac{3}{4}$	2	3	1.3	67.9
5 0	6	6	4	4	6	4 $\frac{1}{2}$	6	0	7	6 $\frac{5}{8}$	3	0	2	0	3	0	3	9	2	0	1	6	10	1 $\frac{1}{4}$	2	3	1.6	85.6
6 0	7	0	4	8	6	10 $\frac{3}{8}$	7	0	8	9	3	0	2	0	3	0	3	9	2	0	1	6	11	3 $\frac{1}{2}$	2	3	2.6	103.5
7 0	7	6	5	0	7	4 $\frac{1}{4}$	8	0	9	11 $\frac{3}{8}$	3	0	2	0	3	0	3	9	2	0	1	6	12	6	2	3	3.0	121.4
8 0	8	0	5	4	7	10 $\frac{1}{8}$	9	0	11	1 $\frac{3}{4}$	3	0	2	0	3	0	3	9	2	0	1	6	13	8 $\frac{1}{4}$	2	3	3.5	139.5

Unidades: ft = pies

in = pulgadas

cfs = pies cúbicos por segundo (cubic feet per second).

FUENTE: Open Channel Hydraulics Vente chow, 1959.

- P = Anchura entre los extremos de las paredes curvadas, a la entrada, en forma de campana.
 R = Radio de curvatura de las paredes acampanadas.
 X = Distancia horizontal al punto de medición H_b , desde el punto inferior de la garganta.
 Y = Distancia vertical al punto de medición H_b , desde el punto inferior de la garganta.

Una canaleta Parshall requiere una pequeña pérdida de carga, es autolimpiable y permite una medición segura, aun cuando esté parcialmente sumergida. El tamaño de la canaleta está determinado por el ancho de la garganta. En el cuadro 3.1 se muestran las dimensiones y capacidades para los medidores Parshall en varios tamaños de garganta. Tales canaletas deben ser construidas de acuerdo con las dimensiones especificadas y las cargas (H_a y H_b), medidas en los puntos señalados en la figura 3.11.

Ecuaciones de calibración para canaletas Parshall. Las relaciones carga-descarga para las canaletas Parshall de varios tamaños, como fueron calibradas empíricamente, son representadas por las siguientes ecuaciones:

Ancho de garganta:

$$3'' \quad Q = 0.992 H_a^{1.547} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$6'' \quad Q = 2.06 H_a^{1.58} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$9'' \quad Q = 3.07 H_a^{1.53} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$12'' \text{ a } 8' \quad Q = 4 W H_a^{1.522} W^{0.026} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$10' \text{ a } 50' \quad Q = (3.6875 W + 2.5) H_a^{1.6} \quad (\text{Ec. 15})$$

En las ecuaciones anteriores, Q es la descarga libre en cfs (cubic feet per second), W es la anchura de la garganta en ft y H_a es la carga superior en ft. Cuando la relación entre las cargas (H_b/H_a) excede los límites de 0.6 para las canaletas de 3, 6 y 9 in, 0.7 para las canaletas de 1 a 8 ft y 0.8 para las canaletas de 10 a 50 ft, el flujo se vuelve sumergido.

El grado de sumersión reduce la capacidad de flujo. En este

caso, la descarga calculada con las ecuaciones anteriores debe ser corregida por una cantidad sustraída. Los diagramas de la figura 3.12 proporcionan la corrección por sumersión para varios tamaños de canaletas Parshall.

La corrección para la canaleta de 1 ft es aplicable a las canaletas más grandes, multiplicando la corrección (para la canaleta de 1 ft) por el factor dado en el cuadro 3.2, para el tamaño particular de canaleta en uso.

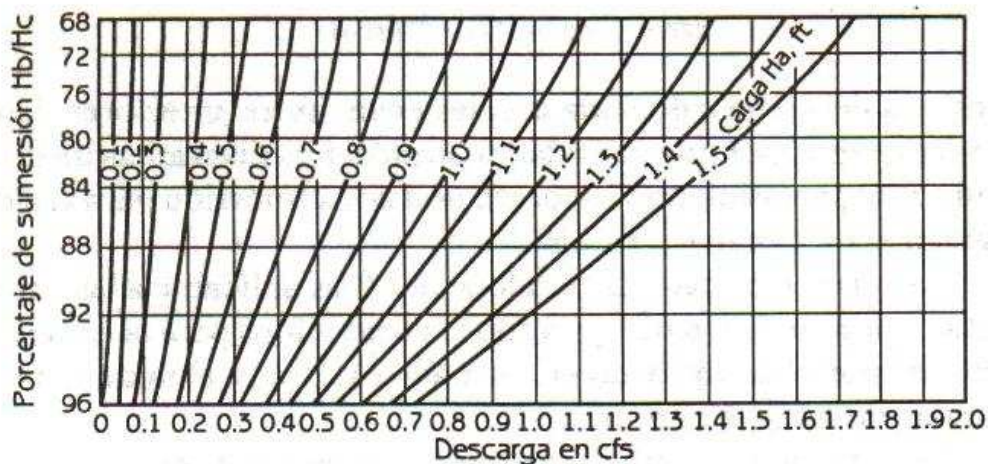
De la misma manera, la corrección señalada para la canaleta de 10 ft se puede aplicar a las canaletas mayores, multiplicando la corrección (para la canaleta de 10 ft) por el factor dado en el mismo cuadro para el tamaño particular seleccionado.

Instalación de una canaleta Parshall. Generalmente, la anchura de la garganta de la canaleta debe tener de un tercio a un medio de la anchura del canal. En comparación con vertederos y orificios, la canaleta de flujo crítico tiene ciertas desventajas, entre ellas, no puede ser usada en combinación directa con una compuerta, además, su construcción es más costosa y requiere mano de obra capacitada.

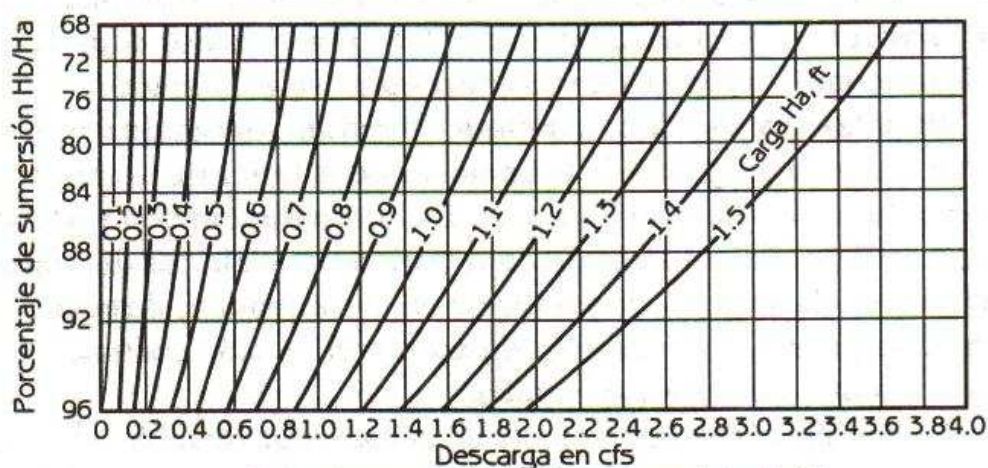
Es deseable instalar la cresta de la canaleta, de tal forma que la descarga libre ocurra. Si las condiciones no permiten el flujo libre, el porcentaje de sumersión H_b/H_a debe ser mantenido, en lo posible, por abajo de 95 %, de otra manera la canaleta perderá confiabilidad si la sumersión es mayor que ese límite práctico.

La aceptable operación de la canaleta Parshall depende de la colocación de la cresta a una altura apropiada por encima del fondo del canal, procurando que la elevación del tirante que resulta aguas arriba del medidor, no rebase el borde libre del canal.

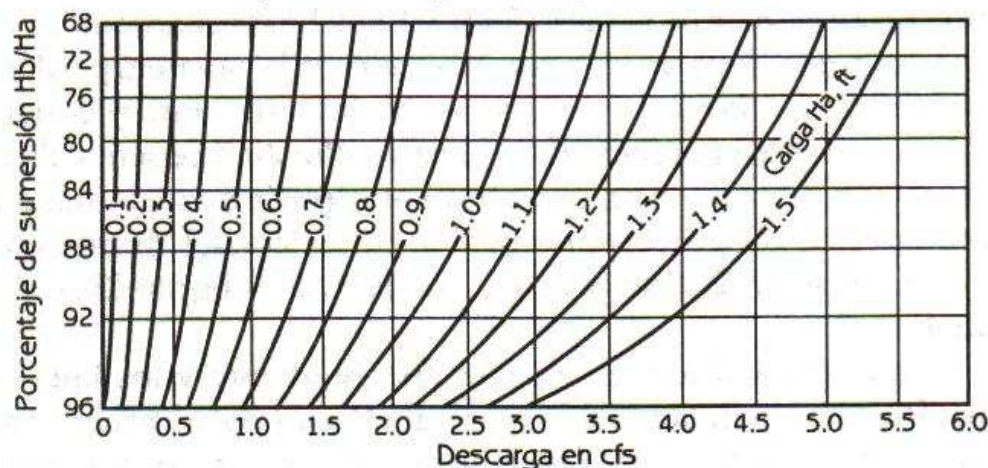
Donde el canal tiene considerable pendiente y los taludes son altos, la canaleta puede ser instalada con pocos problemas operativos, sin embargo, donde los taludes son bajos y la pendiente del canal relativamente plana, el tamaño de la canaleta y el sitio para su instalación, se deben seleccionar más cuidadosamente.



a) Gasto sumergido en cfs para canaleta de 3"

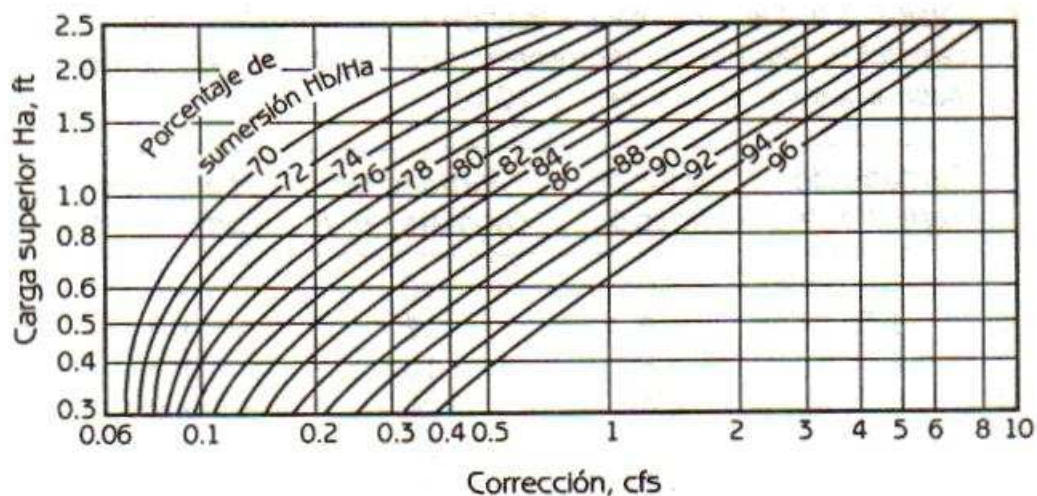


b) Gasto sumergido en cfs para canaleta de 6"

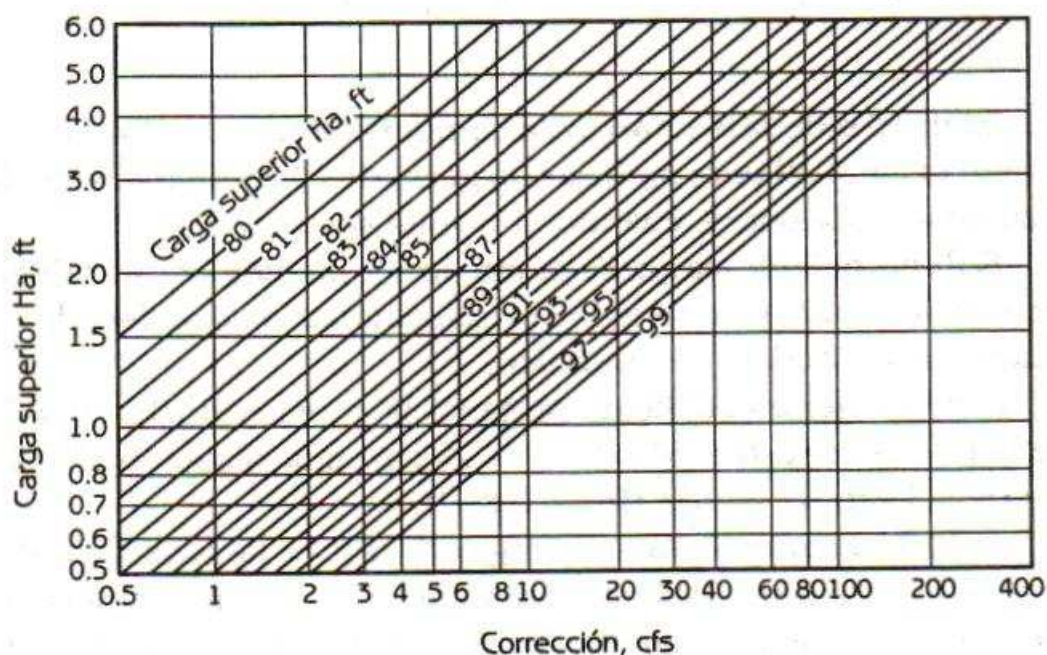


c) Gasto sumergido en cfs para canaleta de 9"

Figura 3.12. Diagramas para calcular y corregir la descarga sumergida en canaletas Parshall de distintos tamaños.



d) Diagrama para corregir la descarga sumergida en canaletas con garganta de 1'



e) Diagrama para corregir la descarga sumergida en canaletas con garganta de 10'

Cuadro 3.2. Factores de corrección por sumersión para canaletas Parshall de diferentes tamaños (tomando como base a las canaletas de 1 y 10 ft).

Tamaño de canaleta, ft	Factor de corrección*	Tamaño de canaleta, W, ft	Factor de corrección**
1	1.0	10	1.0
1.5	1.4	12	1.2
2	1.8	15	1.5
3	2.4	20	2.0
4	3.1	25	2.5
6	4.3	30	3.0
8	5.4	40	4.0
		50	5.0

* La reducción de gasto dada en la figura 3.12d para canaletas de 1 ft es multiplicada por estos factores para corregir la descarga en canaletas de 1.5 a 8 ft sumergidos.

** La reducción de gasto dada en la figura 3.12e es multiplicada por estos factores para canaletas de 10 a 50 ft descargando bajo sumersión.

Ejercicio de selección para canaletas Parshall. Diseñe una canaleta Parshall para manejar un gasto de 20 cfs en un canal de pendiente moderada, cuando el tirante sea de 2.5 ft.

Solución: la descarga dada puede ser medida por canaletas de varios tamaños, pero la mejor selección es la canaleta de tamaño más práctico y económico.

Al proponer un ancho de garganta $W = 4$ ft y $H_b/H_a = 0.7$, se obtiene por sustitución de $Q = 20$ cfs en la ecuación 25, que $H_a = 1.15$ ft, de donde $H_b = 0.81$ ft.

A 70 % de sumersión, la carga H_b , sobre la superficie del agua en la garganta, está prácticamente a nivel con la superficie del agua en el canal. Bajo esta condición de flujo, mostrada en la figura 3.13, el tirante es $d = 2.5$ ft y la elevación de la cresta por encima del fondo del canal es de $X = d - H_b = 2.5 - 0.81 = 1.69$ ft.

La pérdida de carga correspondiente a $H_b/H_a = 0.7$ es lige-

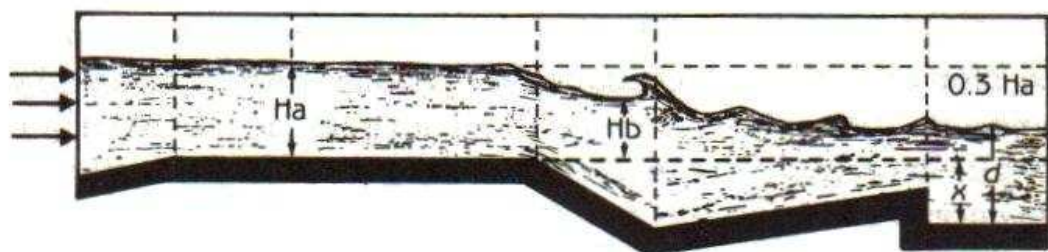


Figura 3.13. Sección de una canaleta Parshall, ilustrando la determinación de la adecuada elevación de cresta.

ramente mayor de $0.3 H_a$, pero para fines prácticos puede considerarse igual; por tanto, el tirante esperado aguas arriba de la canaleta será: $d + 0.3 H_a = 2.5 + 0.35 = 2.85$ ft.

Similarmente, al analizar las canaletas de 2 y 3 ft, se encuentra que las respectivas elevaciones de cresta son 1.53 y 1.23 ft y que los correspondientes tirantes aguas arriba, son 2.94 y 3.08 ft.

Antes de decidir sobre el tamaño más práctico de canaleta, es necesario examinar el bordo libre del canal y el efecto de la elevación del tirante aguas arriba del medidor. Si las condiciones son satisfactorias, la canaleta de 2 ft es la más económica por sus pequeñas dimensiones. Sin embargo, al considerar la anchura del canal, la selección final puede ser en favor de la canaleta de 3 o 4 ft porque pueden requerirse largas paredes acampanadas para una pequeña estructura.

Sifones

No es una estructura de sección contraída, sin embargo, por ser la última en tratar y con objeto de ahorrar espacio, se incluye dentro de esta categoría bajo el subtítulo de "Otros dispositivos".

Los sifones se utilizan en riego por superficie para pasar el agua desde una acequia o canal hacia un surco o melga. También se han usado con éxito para medir el agua aplicada.

Un tubo encorvado, de aluminio o plástico, funciona como un sifón cuando es adecuadamente cebado (llenado con agua) y colocado sobre el bordo de un dique o canal, de tal forma que uno de los extremos se mantenga sumergido en el agua y el otro descargue en el surco o a la entrada de la melga.

La carga por velocidad (h) en un sifón con descarga libre es la diferencia de elevación entre la superficie del agua en el dique y la boca de salida del sifón. En un sifón con descarga ahogada, la carga se mide por la diferencia de elevación del agua entre ambos extremos, como se indica en las figuras 3.14a y 3.14b.

Generalmente, pequeños diámetros de sifón de 1/2 a 2 1/2 in (13 a 63 mm \varnothing) son utilizados para la irrigación en surcos.

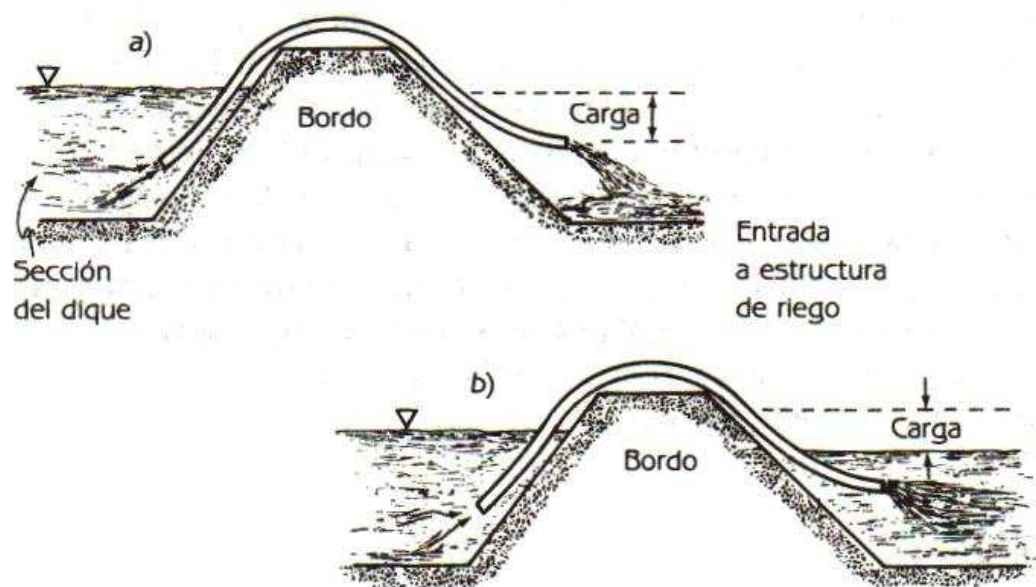


Figura 3.14. Carga por velocidad en sifones con: a) Descarga libre. b) Descarga sumergida o ahogada.

De acuerdo con el teorema de energía, combinado con la ecuación de continuidad, el gasto del sifón (q) varía con el diámetro interno (\varnothing) del tubo y con la carga hidráulica (h) entre ambos extre-

mos, sin embargo, como la rugosidad interna de las paredes retarda la velocidad de flujo, la descarga teórica ($qt = A \sqrt{2gh}$) es multiplicada por un coeficiente de fricción (c), para obtener la verdadera descarga, dada por la siguiente ecuación:

$$q = K_1 c \phi^2 \sqrt{h} \quad (\text{Ec. 16})$$

En donde:

- q = Gasto del sifón en ℓ/s o ℓ/m .
- c = Coeficiente de fricción en decimal menor que la unidad obtenido mediante una prueba de calibración en campo.
- ϕ = Diámetro interno del tubo en cm.
- h = Carga por velocidad en cm.
- K_1 = Constante numérica que adquiere un valor de 0.035 para obtener el gasto en ℓ/s o de 2.087 para obtener el gasto en ℓ/m .

Cebado de sifones. El cebado de los tubos (llenado con agua) y la colocación de la boca de salida por abajo del nivel del agua en la acequia, accionan el principio hidráulico del sifón, manteniendo la continuidad de flujo.

Un sifón puede ser cebado de varias formas, una de ellas consiste en sumergir el tubo en el agua del canal, tapando la boca de salida con la palma de la mano y levantándolo, luego rápidamente se vuelve a sumergir, pero con la palma removida para permitir la expulsión de aire; estos movimientos se deben repetir varias veces en forma rápida hasta que el tubo se llene. Como señal de cebado completo el agua choca contra la palma de la mano y salta, en lugar de crear succión.

Una vez llenado el tubo, se suelta sobre el talud procurando que la boca de salida quede por abajo del nivel del agua en la acequia, de otra manera el tubo se vaciará (por el regreso del agua hacia la acequia) y el cebado tendrá que repetirse.

Los operadores menos diestros pueden encontrar que es más fácil llenar el tubo inicialmente, sumergiéndolo por completo en el agua y después se procede como se describió en el párrafo anterior.

Calibración de sifones. Un sifón se calibra relacionando el volumen descargado con la carga que genera tal descarga; el gasto descargado se afora volumétricamente y la carga se mide con una manguera de albañil, como se muestra en la figura 3.15. Cuanto mayor sea el número de lecturas, más precisa será la calibración. Es recomendable repetir el aforo para una misma carga antes de probar la siguiente.

La relación entre gasto y carga es de tipo exponencial ($q = Kh^x$) y la relación entre gasto y \sqrt{h} es de tipo lineal. Esta última representa una ventaja para la apreciación de la constante $K = K_1 c \phi^2$ en la ecuación 16.

Al correlacionar q con h , el exponente x se desvía ligeramente de 0.5, esto, debido al error instrumental y de observación; por lo que resulta más conveniente correlacionar q con \sqrt{h} forzando la recta a cero para que pase por el origen de coordenadas, como lo indican las figuras 3.16 y 3.17.

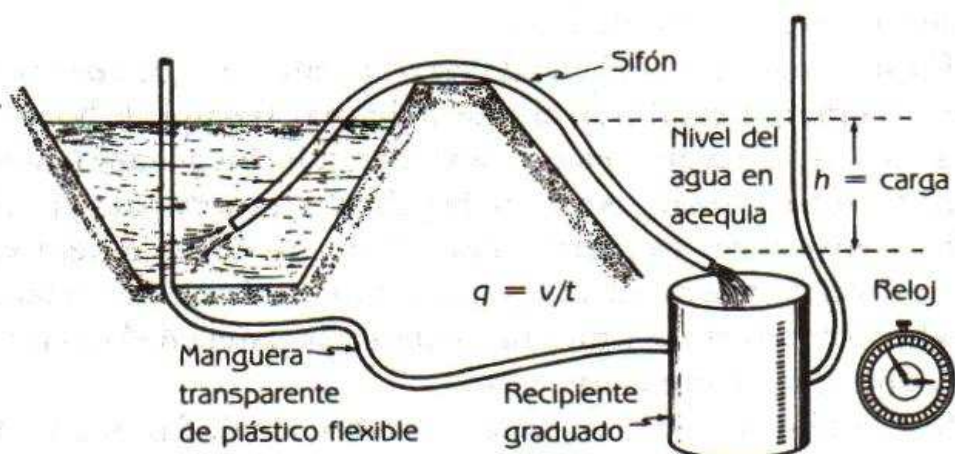


Figura 3.15. Aforo volumétrico del gasto descargado y medición de la carga para calibrar un sifón.

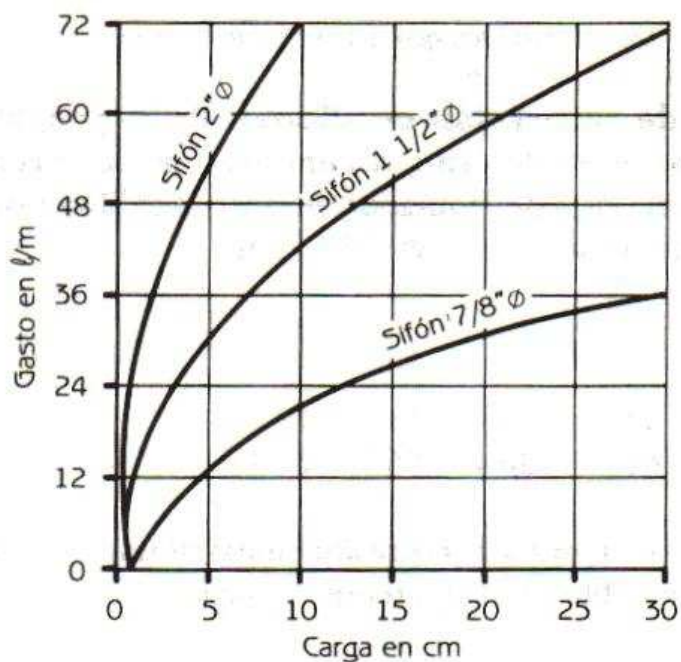


Figura 3.16. Relación exponencial entre gasto y carga en sifones.

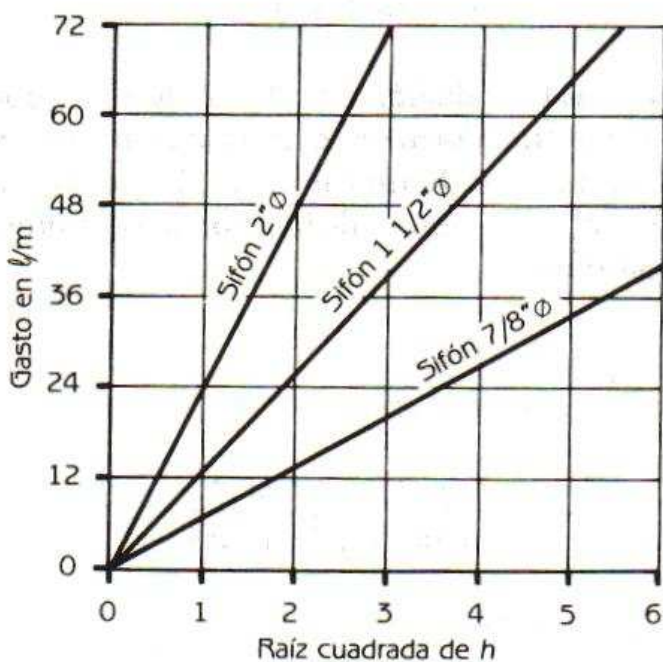


Figura 3.17. Relación lineal de la función exponencial para obtener la constante K de calibración en sifones.

Ejemplo de calibración de sifones. Para ejemplificar el procedimiento antes descrito, a continuación se ajustan, por regresión lineal, los datos tomados durante la calibración de un sifón de aluminio, de 1 1/2" \varnothing (38.1 mm).

Datos:

carga h en cm	5	13	17
gasto q en ℓ/m	36.7	56.7	69.3

Al correr el programa de regresión lineal simple en una calculadora TI-55, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$q = 16.747 \sqrt{h} - 1.374$$

la cual, al ser forzada a cero, quedó como:

$$\hat{q} = 16.371 \sqrt{h}$$

con un coeficiente de correlación $r = 0.992$; donde la constante de calibración K fue transformada para manejar h en metros y obtener q en m^3/s , resultando un valor de 2.73×10^{-3} a partir del cual se calculó el coeficiente c de fricción para el sifón, como se muestra a continuación:

$$c = \frac{4 K}{\pi \varnothing^2 \sqrt{2g}}$$

$$c = \frac{4 \times 2.73 \times 10^{-3}}{\pi(0.0381^2) \sqrt{2 \times 9.81}}$$

$$c = 0.54$$

Ejercicios propuestos

Durante el aforo de una corriente de 2 m^2 de sección transversal, un flotador superficial recorrió una distancia de 100 m en 122, 128, 123, 124 y 128 segundos.

Determine el gasto.

Respuesta: $Q = 1280 \text{ l/s}$

Determine la capacidad de una canaleta Parshall que tiene una anchura de garganta W de 1.25 ft, cuando $H_a = 1.30 \text{ ft}$ y $H_b = 0.90 \text{ ft}$.

Respuesta: $Q = 7.47 \text{ cfs}$

Calcule el gasto para un orificio de 3" de diámetro instalado al final de una tubería, cuya presión es de 35 psi y $c = 0.60$.

Respuesta: $Q = 2.1 \text{ cfs}$

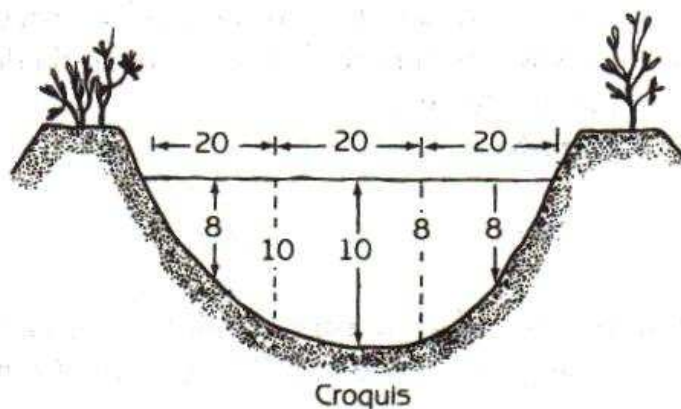
Un depósito cónico de 10 m de diámetro y 8 m de altura, tiene una válvula de 2" \varnothing instalada en el fondo. El gasto de dicho depósito es: $q = Ac \sqrt{2g}$, donde $c = 0.50$. a) ¿Cuál es el tiempo de vaciado? b) ¿En qué tiempo se desaloja 1/3 de su volumen?

Respuestas: a) 9 horas 10 minutos

b) 1 hora 40 minutos

Durante un aforo con molinete de cazoletas Price 622, se tomaron las siguientes lecturas. Calcule el gasto.

Sección	Tirante	rpm
0-20 cm	8 cm	31
20-40 cm	10 cm	40
40-60 cm	8 cm	30



Respuesta: $Q = 17.5 \text{ l/s}$

Una tubería de 8" de diámetro, descargada parcialmente con $x = 50 \text{ cm}$ y $y = 80 \text{ cm}$, tiene un borde libre de 2". ¿Cuál es su gasto?

Respuesta: $Q = 32.3 \text{ l/s}$

¿Cuál es el gasto que descarga un tubo horizontal de 6" de diámetro, parcialmente lleno, cuando el borde libre es de 4", $x = 30 \text{ cm}$ y $y = 45 \text{ cm}$?

Respuesta: $Q = 5.3 \text{ l/s}$

La diferencia de presiones entre la entrada y la garganta de un medidor Venturi de $3" \times 1"$ se mide con un manómetro diferencial de mercurio, graduado en centímetros.

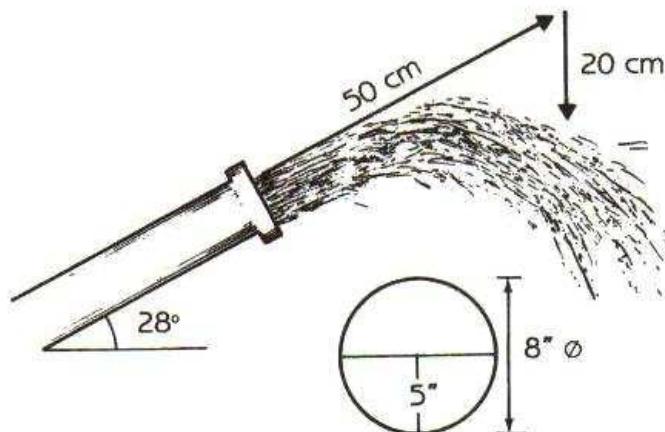
- Calcule la constante numérica K en la ecuación del gasto teórico, en la forma $Q = K \sqrt{h}$, donde h es la diferencia de mercurio en centímetros.
- Calcule el coeficiente del medidor, si la diferencia promedio de mercurio es $h = 30$ cm, durante una prueba en la que se descargan 538 litros de agua en 125 segundos.

Respuestas: a) 0.802 b) 0.98

Exprese la fracción de área para una tubería parcialmente llena en función de la relación d/D (borde libre en relación con el diámetro). Pruebe la función seno u otra ecuación de ajuste.

Una tubería de $8" \varnothing$ está descargando parcialmente llena y con un ángulo de inclinación de 28° ascendente. La hipotenusa del triángulo sobre la trayectoria del chorro mide 50 cm, y el segmento del cateto opuesto por encima de la trayectoria es de 20 cm. ¿Cuál es el gasto, si el tirante es de $5"$ a la salida del tubo?

Respuesta: 52.8 l/s



Referencias bibliográficas

1. Ametek, Inc., *Add our line to your lines*, McCrometer Division 3255 W. Stetson Ave, Hemet, CA 92 343 (714) 652 6811, 1985.
2. Ametek, Inc., *Proper flow meter installation*, McCrometer Division, Irrigation Age, A Webb Publication, enero, 1979.
3. Chow Ven Te, *Open Chanel hydraulics*, Civil Engineering Series, McGraw-Hill, págs. 70-81, 1959.
4. Eisenhauer, D., *Flow meters first step towards water management*, Irrigation Age. A Webb Publication, marzo, vol. II, Núm. 6:8-10, 1977.
5. Giles, R. V., *Mecánica de los fluidos e hidráulica*, traducción de la 2a. ed., en inglés, *Fluid Mechanics and Hydraulics*, por Jaime Moneva. (Serie de compendios Schaum.) McGraw-Hill, México, págs. 133-155.
6. Hansen, I., *Principios y aplicaciones de riego*, 2a. ed., traducción de la 3a. ed., en inglés, *Irrigation Principles and Practices*, por Alberto García P., Barcelona, págs. 100-43, 1975.
7. Industry Index, *Venturi meter with flow totalizer*, Colorado, Irrigation Age. A Webb Publication, diciembre 1985, vol. 20, Núm. 4:21, 1986.
8. King, H. W. y Brater E. F., *Manual de hidráulica*, traducción del inglés, *Handbook of hydraulics*, por Santiago Alonso, UTEHA, págs. 81-96, 1962.
9. King, H. W., Wisler, CH. O. y Woodburn, J. G., *Hidráulica*, traducción de la 5a. ed. en inglés *Hydraulics*, por Agustín Contin Sanz, Trillas, págs. 107, 113, 121, 137, 150, 167, 1980.
10. Linsley, R. K y Franzini, J. B., *Water resources engineering*, 3a. ed., McGraw-Hill, Nueva York, págs. 260, 265, 290, 292, 1979.
11. Metcalf, L. y Eddy H. P., *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*, versión en español de la obra original en inglés *Sewerage*

- and sewage disposal*, por Fernando Troyano L., Labor, Madrid, págs. 88-105, 1977.
12. Mazzei Injector Corporation, *Trouble-free injection of fertilizers into irrigation systems*, Bakersfield, California 93 307, *Irrigation Journal*, enero-febrero, 1985.
 13. Pair C. H., *Sprinkler irrigation*, 4a. ed., *The Irrigation Association*, 1975.
 14. Ross, R., *Get more accuracy from flow meters*, Irrigation Age. A Webb Publication, abril, 1979, vol. 13, núm. 7, págs. 20-21, 1979.
 15. Scott, V. H. y Houston, C. E., *Measuring Irrigation Water*, California Agricultural Experiment Station Extension Service, Division of Agricultural Science, University of California, Circular 473, págs. 1-22, 1959.
 16. Schwab, G. O., Barnes, K. K., Frevert, R. K. y Edminster, T. W., *Elementary soil and water engineering*, 2a. ed., John Wiley, Nueva York, págs. 179-187, 1971.
 17. Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Tabla de velocidades para molinetes Gurley 622*, Dirección de Hidrología, Departamento de Hidrometría, TGN, págs. 6219-67, GC-4091.
 18. Viejo Zubicaray, M., *Bombas: Teoría, diseño y aplicaciones*, 2a. ed., Limusa, México, págs. 201-207, 1983.

Índice analítico

Aforo

- con molinete, 36-37
- cálculo del gasto, 36c
- de caudales
- clasificación del, 8-10
- método
 - gravimétrico para el, 8
 - volumétrico para el, 8
- de la descarga libre en tuberías, 37-43
- del trazador. Véase Aforo químico
- directo, métodos de, 9
- gravimétrico, 16
- por el método de la trayectoria, 41-43
- por medición del cambio en el nivel de agua, 23
- químico, 16-19
 - de una corriente, 18f
 - y toma de muestras, 18f
- radiactivo. Véase Aforo químico
- volumétrico, 15
 - de un aspersor agrícola de doble boquilla, 15f
 - de un grifo casero, 15f
 - medidores de, 19

Agua

- aforo por medición del cambio en el nivel del, 23
- conductividad eléctrica del, 17
- manejo del, 7-8
- medición del, 7

Bernoulli, teorema de energía de, 51

Botella Mariotte, 18-19

Calibración de sifones, 80-82

Canal

- distribución típica de un, 27-28f
- velocidad
 - máxima de un, 27
 - media de un, 27
 - mínima de un, 27

Canaleta de medición Parshall, 9, 68-72

- cálculo de una, 74f-75f
- corrección de una, 74f-75f
 - factores de, 76c
- descripción, 69-70f, 72
- diseño, 68-69
- ecuaciones de calibración para, 72
- historia, 68-69

- instalación de una, 73
- Cebado
 - de sifones, 79-80
 - de tubos. Véase Cebado de sifones
- Cipolletti, vertedero, 66
 - fórmula para un, 66
- Collins, medidor de, 45, 47
- Cox, medidor, 47
- Descarga de vertederos, 63-68
- División de Recursos Hidráulicos del Departamento de Geología de los Estados Unidos de América, 36
- Flotador(es)
 - método del, 29-32
 - objetos que funcionan como, 31
- Flujo
 - por compuertas, 59-62
 - por orificios, 59-62
- Gurley, molinete, 36
- Hélice
 - medidores de, 19-23
 - instalación de los, 23
 - tipo
 - silleta, 21
 - tubo, 21
 - molinetes de, 32-33f
- Herschel, C., 51
- Inyectores para sistemas de riego
 - tipo Venturi, 57-58f
- Mariotte, botella de, 18-19
- Medición
 - de la carga sobre un vertedero, 67-68
 - del aforo, 23
 - del agua, 7-8
- Medidor(es)
 - Collins, 45, 48
 - Cox, 48
 - de aforo volumétrico, 19
 - de hélice, 19-23
 - características, 19
 - curva de pérdida de carga para, 20f
 - de gasto tipo, 20f
 - exactitud típica, 20f
 - instalación, 23
 - tipo
 - silleta, 21
 - tubo, 21
 - ventajas, 19
 - Pitot, 43-48
 - instalación, 46f
 - Price, 622, 35-36
 - Venturi, 51-59
 - características, 52
 - ecuación de descarga para un, 53-56
 - en la inyección de agroquímicos, 56-59
 - típico, 52f
- Método(s)
 - área-velocidad, 9
 - con secciones contraídas, 9
 - de aforo
 - clasificación de los, 8-10
 - directo, 9
 - de la trayectoria, 29
 - aforo de la descarga libre en tuberías, 37-43
 - del flotador, 29-32
 - del molinete hidrométrico, 32-37
 - del tubo Pitot, 43-47
 - para el aforo de caudales, 8

- gravimétricos, 8
- volumétricos, 8
- Molinete(s)
 - aforo con, 36-37
 - cálculo del gasto, 36c
 - de cazoletas, 33f-36
 - ecuación de calibración del, 35c
 - Gurley, 36
 - hidrométrico, 33f
 - método del, 32-37
 - tipo hélice, 32-36
 - ecuación de calibración del, 35c
- Parshall, canaleta de medición, 9, 68-72
 - cálculo de una, 74f-75f
 - corrección de una, 74f-75f
 - factores de, 76c
 - descripción, 69-70f, 72
 - diseño, 68-69
 - ecuaciones de calibración para, 72
 - historia, 68-69
 - instalación, 73
- Pitot, tubo de
 - características, 43
 - exactitud del, 48
 - instalación, 46f
 - método del, 43-47
- Puente Wheatstone, 17
- Sal de cocina, 17
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, en México, 36
- Sifón con descarga
 - ahogada, 78f
 - libre, 78f
 - sumergida. Véase Sifón con des-
- carga ahogada
- Sifones, 77-83
 - calibración de, 80-82
 - carga por velocidad, 78f
 - cebado de, 79-80
 - gasto de, 80-81
 - medición de la carga de, 80-81
- Silleta, medidores tipo, 21-22f
- Solución salina, 17
 - y conductividad eléctrica del agua, 17
- Teorema
 - de energía de Bernoulli, 51
 - de Torricelli, 60-62
- Torricelli, teorema de, 60-62
- Tubo
 - medidores tipo, 21-22f
- Pitot
 - características, 43
 - exactitud del, 48
 - instalación, 46f
 - método del, 43-47
- Universidad de Dakota del Sur, 47
- Universidad de Davis, 47
- Venturi
 - inyectores tipo, 57-58f
 - medidor(es), 9, 51-59
 - características, 52
 - con registrador de gasto, 57f
 - ecuación de descarga para un, 53-56
 - en la inyección de agroquímicos, 56-59
 - típico, 52f
 - principio del, en inyección de agroquímicos, 56-59
 - vertical con flujo ascendente, 58f

Vertedero(s)

Cipolletti, 66

fórmula, 66

descarga en, 63-68

instalación, 67-68

medición de la carga sobre un,
67-68

rectangulares, 63-65

de cresta aguda, 64f

trapeciales, 66

Cipolletti, 66f

triangulares, 65-66

Wheatstone, puente de, 17

AFORO DEL AGUA
En canales y tuberías
Gregorio Briones Sánchez
Ignacio García Casillas

Este manual presenta el principio hidráulico, teoría y aplicaciones de los métodos del aforo generalmente recomendados para la medición del agua en canales y tuberías. Su finalidad es servir como apoyo didáctico a los estudiantes de agronomía, sobre todo en lo referente al aforo del agua de irrigación, aunque también puede ser empleado como material de consulta por técnicos y profesionales relacionados con la medición del gasto y control de los recursos hidráulicos.

Contenido:

- Métodos para el aforo de caudales
 - Métodos área-velocidad
- Métodos que utilizan contracciones



García Casillas Ignacio

IGNACIO GARCÍA CASILLAS



628000026



9 789682 454707