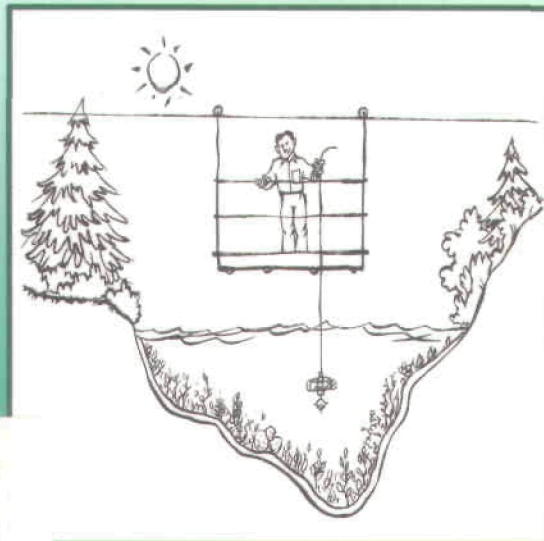


SERIE AUTODIDÁCTICA DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA



AFOROS DE DESCARGAS

Autor: Alfredo A. González Camacho

Revisores CNA: Miriam Beth Arreortúa Cosmes
Luis Miguel Rivera Chávez

Editor: César G. Calderón Mólgora

©Comisión Nacional del Agua, CNA
©Instituto Mexicano de Tecnología
del Agua, IMTA

Edita:

La Gerencia de Recaudación y Control de la Subdirección General de Administración del Agua.
Comisión Nacional del Agua.

La Coordinación de Tecnología Hidráulica.
Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

Imprime:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

ISBN 968-7417-88-9

PARTICIPANTES

En la realización de este documento, colaboraron : Especialistas del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA y de la Subdirección General de Administración del Agua, CNA

Autores:

Alfredo A. González Camacho.

Revisores CNA:

Miriam Beth Arreortúa Cosmes.

Luis Miguel Rivera Chávez.

Editor:

César G. Calderón Mólgora.

Corrector de estilo:

Antonio Requejo del Blanco.

Diseño:

Mayra Leticia Navarrete Morales .

Ilustraciones:

Eduardo Rodríguez Martínez.

Para mayor información dirigirse a:

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
SUBGERENCIA DE INSPECCIÓN Y
MEDICIÓN.

Ing. Roberto Merino Carrión

roberto.merino@cna.gob.mx

Insurgentes Sur N°1960, 1^{er} piso, Colonia Florida C.P. 01030, México D.F.
Tel. 01(55) 53-22-24-00 ext. 6607

Fax ext. 6608

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA.
SUBCOORDINACIÓN DE CALIDAD
E HIDRÁULICA INDUSTRIAL.

M.I. Marco Antonio Toledo Gutiérrez

mtoledo@tlaloc.imta.mx

Paseo Cuauhnáhuac N° 8532, Colonia Progreso, CP. 62550, Jiutepec, Morelos.

Teléfono y Fax 01(777)3-20-87-25.

Derechos reservados por Comisión Nacional del Agua, Insurgentes Sur N° 2140, Ermita San Ángel; C.P. 01070, México D.F. e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac N° 8532, Colonia Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos.

Esta edición y sus características son propiedad de la Comisión Nacional del Agua y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

CONTENIDO	PÁGINA
PREFACIO	I
¿PARA QUIÉN? ¿POR QUÉ? Y EVALÚA SI SABES	II
1 MÉTODOS DE AFORO USUALES PARA LA MEDICIÓN DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES	1
1.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE AFORO	1
1.2 CANALES	4
1.3 CONDUCTOS	17
1.4 DESCARGAS SUMERGIDAS	20
1.5 DESCARGA SUBTERRÁNEA	20
2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS PROPORCIONALES AL CAUDAL	21
RESUMEN	27
AUTOEVALUACIÓN	29
BIBLIOGRAFÍA	30
GLOSARIO	31
RESPUESTAS A LAS AUTOEVALUACIONES	33
ANEXO	

PREFACIO

La Comisión Nacional del Agua (CNA), órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), tiene la atribución de administrar y custodiar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Como parte de la estrategia de la CNA para preservar la calidad de las aguas nacionales, la Subdirección General de Administración del Agua, en colaboración con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha editado la primera parte del *Paquete Auto-didáctico para Medición de la Calidad del Agua*, que tiene como objetivo capacitar al personal que realiza visitas de inspección, a fin de que la toma y conservación de muestras de agua residual se realice de manera confiable, de forma segura y sin vicios técnicos que pudieran invalidar la visita, así como proporcionarle los principios para identificar y describir los diversos sistemas empleados para el tratamiento del agua residual.

Esta primera parte, consta de ocho unidades que se elaboraron con la finalidad de presentar los procedimientos de manera sintética, amena y sencilla, de tal manera que además de ser manuales de capacitación, sirvan como guías de referencia rápida que unifiquen los criterios en la aplicación de los procedimientos descritos y en la identificación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

La unidad inicial, denominada *Fundamentos Técnicos para el Muestreo y Análisis de Aguas Residuales*, contiene conceptos básicos sobre contaminación del agua y los requisitos necesarios para llevar a cabo un muestreo conforme a lo estipulado en la NOM-001-ECOL-1996; las siguientes unidades se derivan de ésta, y por ello es recomendable que el usuario de esta serie inicie la autocapacitación con dicha unidad.

La segunda, tercera y cuarta unidad se refieren al muestreo y preservación de contaminantes específicos, así como a las determinaciones en campo (pH, temperatura y materia flotante).

La quinta unidad, llamada *Aforo de Descargas* aborda las técnicas más adecuadas para cuantificar el caudal del agua residual descargada, de acuerdo a las diversas condiciones que puedan presentarse en campo.

La sexta unidad, plantea los procedimientos de seguridad e higiene que los inspectores deben observar durante el desarrollo del muestreo, a fin de asegurar su integridad física y la de la muestra.

Finalmente, las dos unidades restantes se enfocan a la descripción de los principios de funcionamiento de los sistemas primarios y secundarios de tratamiento de aguas residuales, de tal forma que el inspector pueda detallar en el acta los equipos que observa.

Cada unidad cuenta, con una presentación en disco compacto para PC (CD ROM), que resalta los aspectos más importantes señalados en el texto y se apoya en fotografías e ilustraciones adicionales que refuerzan los conceptos planteados.

AFOROS DE DESCARGAS

¿Para quién?

Este manual se dirige a los especialistas técnicos de las brigadas de *inspección y verificación*, quienes se encargan del muestreo de las descargas de los usuarios en aguas nacionales.

¿Para qué?

Este manual se elaboró con el fin de proporcionar al usuario los fundamentos para:

- Elegir un método de aforo adecuado a las características de una descarga de aguas residuales.
- Calcular y preparar una muestra compuesta proporcional a los caudales medidos durante la toma de las muestras puntuales.

Evalúa si sabes

¿Cualquier equipo de medición de flujo es apto para aforar descargas de aguas residuales? ¿Por qué?

¿Cuáles son las características de un flotador?

¿Cómo se mide la velocidad de un caudal usando un molinete?

¿Cuál es la carga mínima requerida para que un vertedor mida con precisión?

¿En que consiste el método volumen-tiempo?

¿Cómo se puede aforar una descarga sumergida?

¿Cómo se prepara una muestra compuesta proporcional al caudal?

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, la Comisión Nacional del Agua (CNA) es la encargada de regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr el desarrollo integral sustentable.

Una de las acciones que lleva a cabo la CNA para preservar la calidad de las aguas nacionales es la vigilancia, mediante visitas de inspección y verificación de las descargas de aguas residuales. Parte fundamental del procedimiento seguido en dichas visitas es el aforo de las descargas, ya que permite establecer el comportamiento, desde un punto de vista volumétrico. El complementar esta información con las determinaciones analíticas hace posible determinar la concentración promedio de los contaminantes vertidos y la carga contaminante, producto de la concentración de contaminantes (en mg/L) por el caudal y por el tiempo que dure el ciclo. Por ello, es importante que la determinación del caudal se realice con precisión ya que las determinaciones imprecisas llevarán a cálculos poco confiables y, finalmente, puede llevar a la toma de decisiones incorrectas o inoportunas.

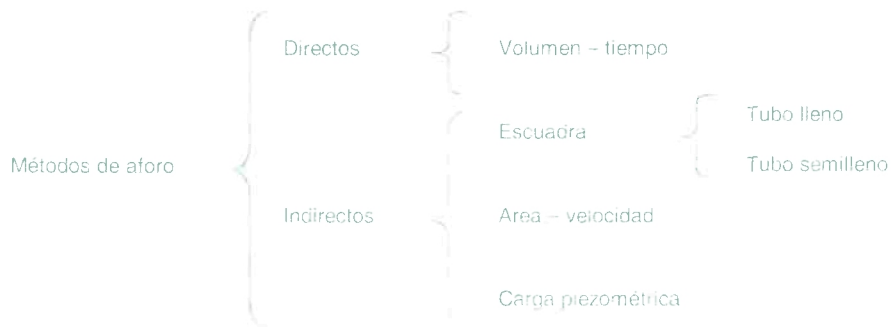
1 MÉTODOS DE AFORO USUALES PARA LA MEDICIÓN DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES

Al término de esta unidad, el usuario será capaz de seleccionar y aplicar el método de aforo más adecuado a las características de una descarga de agua residual.

1.1 Selección del método de aforo

Para que el aforo de una descarga sea confiable, el método de medición y el tipo de medidor deberán ser los que mejor se adapten a las características del agua y la configuración física de la descarga. La figura 1.1 presenta los métodos de aforo.

Sin duda, el método más confiable es



el de volumen-tiempo; sin embargo, la posibilidad de aplicarlo es bastante limitada, abarca descargas pequeñas que se puedan medir en recipientes de volumen previamente calibrado que se lleven al sitio, o en su defecto, contar con un tanque o estructura de dimensiones conocidas en la cual se vacíe el agua durante un periodo determinado.

Dada la dificultad práctica de aplicar el método volumen-tiempo, se ha optado por medir otras variables físicas distintas del gasto, y mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes se obtiene el caudal.

Cada uno de los equipos de los que se valen los métodos indirectos tienen algunas condiciones específicas en las que pueden medir con precisión el caudal. En general, esos equipos fueron desarrollados para medir agua limpia, por ello, cuando se aplican a descargas de aguas residuales,

Figura 1.1 Los métodos de aforo.

es necesario hacer las siguientes preguntas ¿Pueden medir descargas de agua fría y agua caliente? ¿Son susceptibles de ser corroídos por el agua o algún compuesto en la descarga? ¿La presencia de sólidos suspendidos afecta su desempeño? ¿Requieren de una preparación especial?

En la serie *medición del agua* se analizan varios tipos de medidores, muchos no son de utilidad para aforar las descargas por no ser portátiles y por requerir de preparación de la infraestructura para colocarlos, tales

como los medidores de hélice y los de turbina, el tubo venturi y la placa de orificio; o bien, requieren obra civil especial, tales como el canal Parshall y el aforador de garganta larga. Por ello, el aforo de la descarga con estos equipos sólo se podrá hacer si el usuario cuenta con alguno de estos equipos ya instalado.

Por otra parte, medidores como el tubo pitot, los ultrasónicos de tiempo en tránsito, así como los de efecto doppler en canales se ven afectados por la presencia de sólidos suspendidos.

Así, las opciones que tienen los inspectores para el aforo de descargas se reducen a los métodos de la escuadra, volumen-tiempo, área velocidad (molinete o flotador en canales y ultrasónico de efecto doppler en tuberías) y carga piezométrica (con vertedores que se instalen en campo y de esa forma llevar a cabo el aforo de la descarga).

En la tabla 1.1 se señalan condiciones y restricciones de los métodos y los dispositivos o equipos que los inspectores podrán utilizar para el aforo de las descargas.

Tabla 1.1 Condiciones y restricciones de los métodos y dispositivos "portátiles" para el aforo de descargas.

Método de aforo	Equipo o dispositivo	Condiciones	Restricciones	Aplicación
Área velocidad	Flotador	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de corrientes que conducen gastos pequeños como 100 L/s. • Tramo del cauce en estudio lo más recto posible, alejado de curvas y que el agua corra libremente. • Sección transversal lo más regular posible. • Profundidad suficiente para que el flotador no toque el fondo 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay que tomar en cuenta los coeficientes debidos a la variación del viento. • El flotador debe adquirir una velocidad cercana a la velocidad superficial del agua. • En corrientes turbulentas no se obtienen buenos resultados. • El flotador no debe ser muy ligero, ni muy pesado 	<ul style="list-style-type: none"> • Canales a cielo abierto, carentes de estructuras de aforo (vertedores) y cuando no sea posible instalar algún otro dispositivo.
Área velocidad	Molinete	<ul style="list-style-type: none"> • La corriente puede ser profunda o no profunda. • El molinete mecánico requiere de una profundidad mínima de 0.10 m y puede medir velocidades de caudal de 0.07 a 2.0 m/s. • El molinete eléctrico de copas pigmeo o enano está destinado para bajas velocidades y corrientes poco profundas: menores que 2.0 m y puede operar desde 0.015 a 0.6 m/s. 	<ul style="list-style-type: none"> • El molinete requiere calibración en laboratorio acreditado. • Se requiere de una tabla, gráfica o ecuación y se podrá usar exclusivamente para el molinete calibrado. • Puede requerir de un escandallo para disminuir el arrastre por la corriente, • El uso de escandallo requiere corrección por desviación de la vertical, • Los molinetes eléctricos requieren de mantenimiento para verificar su continui- 	<ul style="list-style-type: none"> • En canales a cielo abierto e incluso cubiertos, pero no presurizados. Es necesario conocer la sección transversal de la corriente por donde fluye el agua.

Tabla 1.1 Condiciones y restricciones de los métodos y dispositivos “portátiles” para el aforo de descargas (continuación).

Método de aforo	Equipo o dispositivo	Condiciones	Restricciones	Aplicación
Área velocidad	Molinete	<ul style="list-style-type: none"> El molinete eléctrico de copas grande es usado para altas velocidades y grandes corrientes. Se usa en profundidades mayores de 2.0 m y puede operar desde 0.02 m/s a 4.0 m/s. 	<ul style="list-style-type: none"> Se deben considerar los materiales de construcción para el uso que se le darán a los molinetes a fin de que funcionen satisfactoriamente. 	
Carga piezométrica	Vertedores	<p><i>Rectangular</i></p> <ul style="list-style-type: none"> El vertedor rectangular se utiliza entre 30 y 300 lps. La variación de la carga hidráulica debe ser desde 0.061 m hasta 0.61 m, para el gasto medio. La carga no debe ser mayor de un tercio de la longitud de la cresta (L/3). La carga no debe ser mayor de 60 cm. Su longitud debe ser por lo menos tres veces la carga (3h). <p><i>Triangular</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Se prefiere el vertedor triangular cuando se requiere aforar caudales menores a 30 lps. La variación de la carga hidráulica debe ser desde 0.061 m hasta 0.61 m, para el gasto medio. La carga no debe ser mayor de 60 cm. 	<p><i>Rectangular</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Es mejor usar un vertedor rectangular sin contracciones. Los vertedores con contracciones laterales no han sido experimentados suficientemente, por lo que su empleo no es con el mismo grado de seguridad que otros. La cresta debe quedar a nivel en sus extremos. <p><i>Triangular</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Utilizado sólo para gastos pequeños. Para fines prácticos sólo se construyen de 60° y 90°. 	<ul style="list-style-type: none"> La medición se basa en el funcionamiento de una sección hidráulica conocida y calibrada, de tal forma que con sólo conocer la carga hidráulica de operación, se conoce el gasto que pasa por la sección.
Carga piezométrica	Vertedores	<p><i>Todos los vertedores</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Antes de llegar al vertedor, el canal de acceso debe ser recto, al menos diez veces la longitud de su cresta (10 L). 	<p>Todos los vertedores.</p> <ul style="list-style-type: none"> El porcentaje de error en la medición del caudal disminuye a medida que la carga aumenta. Existe una mayor exactitud cuando el derrame tiene lugar bajo la carga máxima posible dentro de las limitaciones de cada vertedor. Los vertedores deben colocarse perpendicularmente a la dirección del 	

Tabla 1.1 Condiciones y restricciones de los métodos y dispositivos “portátiles” para el aforo de descargas (fin).

Método de aforo	Equipo o dispositivo	Condiciones	Restricciones	Aplicación
Carga piezométrica	Vertedores	<p><i>Todos los vertedores</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Antes de llegar al vertedor, el canal de acceso debe ser recto, al menos diez veces la longitud de su cresta (10L). 	<p>Todos los vertedores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La cresta y los laterales del vertedor deben ser rectos y afilados. • Aguas abajo del canal no debe haber obstáculos a fin de evitar ahogamiento o <i>inmersión de la descarga del vertedor</i>. • En el proceso de evitar que se ahogue se pierde mucha carga. • Con muy poca pendiente, el canal no funciona. • No se pueden combinar con estructuras de distribución o derivación. • Se azolvan y se nulifican las condiciones de aforo cuando los sedimentos se depositan en el fondo, por lo que es necesario realizar un mantenimiento continuo. • Una de sus limitaciones es que se incrementan los tirantes aguas arriba del vertedor, aumentando las filtraciones, por generar una mayor carga hidráulica y mayor perímetro mojado o 	<ul style="list-style-type: none"> • La medición se basa en el funcionamiento de una sección hidráulica conocida y calibrada, de tal forma que con sólo conocer la carga hidráulica de operación, se conoce el gasto que pasa por la sección.
Volumen / tiempo.	Recipiente de volumen conocido y cronómetro.	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente con caída libre. • Caudales pequeños y de poca velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Errores con chorros violentos. • Requiere calibración del recipiente utilizado y tener vigente su certificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas libres.
Escuadra.	Escuadra.	<ul style="list-style-type: none"> • Tubos horizontales. • Descarga libre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia de por lo menos 1 metro entre la descarga y alguna pieza especial, 	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas libres.

1.2 Canales

En este apartado se analizarán los métodos para medición de velocidad de la corriente de agua. En el anexo se presentan métodos para el cálculo de sección transversal.

1.2.1 Método de área velocidad con flotador

Un flotador es un objeto suspendido o flotante que es arrastrado por la corriente con su misma velocidad. El flotador puede ser cualquier objeto

flotante, que se vea con facilidad; puede estar hecho de madera, corcho, poliuretano u otro material flotante. Para que se le considere un buen flotador debe reunir las siguientes condiciones:

- La parte expuesta al viento debe ser lo más reducida posible, pero el flotador siempre debe estar visible.
- La parte sumergida no debe ser voluminosa, para evitar interferencia con objetos sumergidos.
- Debe ser, en lo posible, simétrico y de preferencia de plantilla redonda, esto con objeto de que al rotar siga ofreciendo la misma resistencia tanto al agua como al aire.
- De fácil manejo, resistente a las sacudidas bruscas, sencillo de construir, ligero y económico.
- Fácil de transportar.
- Debe ser pequeño, ya que muchos canales de descarga tienen poca profundidad.
- Debe adquirir una velocidad muy cercana a la velocidad de la corriente de agua, y esto sólo se consigue si es ligero y está poco expuesto al viento.

Se han utilizado con éxito flotadores fabricados con dos corchos unidos mediante un tornillo, que además sirve de lastre. El flotador mide de 7 a 10 cm de altura y solamente un 20% del flotador sobresale del agua. La figura 1.2 muestra el flotador propuesto.

La determinación de la velocidad del flotador, se hace midiendo el tiempo que tarda en ser arrastrado por una corriente en un tramo recto de longitud conocida. En seguida se divide la

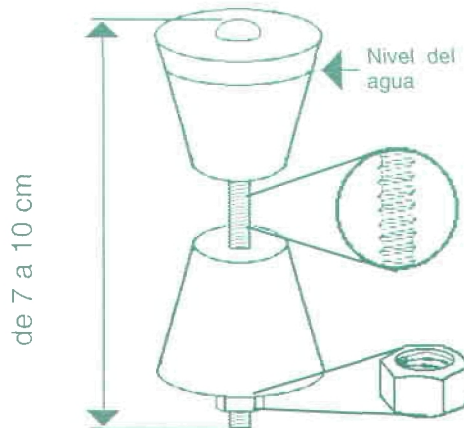


Figura 1.2 Flotador.

longitud entre el tiempo que le tomo recorrer esa distancia. Por supuesto, si el flotador no ha tenido algún obstáculo, se puede decir que el resultado de la operación es igual a la velocidad superficial de la corriente.

Para medir el gasto con flotador se debe:

- Verificar que se cuenta con el flotador, cronómetro, cinta métrica y varilla (1 m).
- En campo se debe seleccionar una sección lo más recta posible con una longitud de al menos 10 metros con una sección transversal lo más regular posible (figura 1.3), en donde el agua corra libremente y no quede estancada, El tramo selec-

cionado debe alejarse de zonas rápidas y de cambios de dirección.

- Marcar con estacas o señales visibles, por lo menos, los puntos inicial y final del tramo seleccionado (figura 1.3).

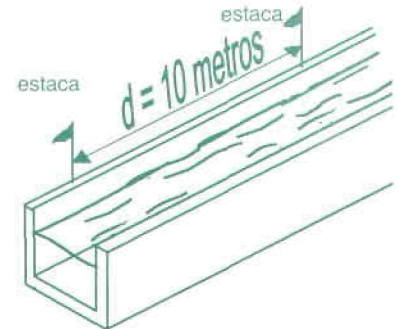


Figura 1.3 Tramo de sección conocida para medición de velocidad.

- Medir el área de la sección transversal en los puntos marcados. Colocar el flotador en la corriente cuando menos un metro antes del punto inicial del tramo seleccionado, a fin de que al momento de pasar en este punto, se haya alcanzado la velocidad superficial del flujo. Es importante considerar que el flotador debe desplazarse al centro del espejo de agua del tramo seleccionado.
- Por último, calcular la velocidad media de la corriente a partir de la velocidad superficial; esta última velocidad debe calcularse con

respecto al tiempo (t) que tomó al flotador recorrer la longitud del tramo seleccionado (l). Por lo tanto, la velocidad superficial se debe estimar como sigue:

$$V_s = \frac{l}{t}$$

Donde:

- V_s = velocidad superficial de la corriente [m/s].
- l = longitud del tramo seleccionado [m].
- t = tiempo en que el flotador recorre la longitud del tramo seleccionado [s].

Para tener la certeza de la medición del tiempo, se debe repetir su medición por lo menos tres veces. Una vez obtenida la velocidad superficial, se estará en posibilidad de calcular la velocidad media de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_m = k V_s$$

Donde:

- V_m = velocidad media de la corriente, [m/s].
- k = coeficiente adimensional que varía de 0.85 a 0.95 y que depende de las condiciones del viento.
 - $k = 0.90$ cuando no se presenta viento.

- $k = 0.95$ cuando se presenta viento frenando la velocidad del caudal.
- $k = 0.85$ cuando existe viento pero no frena la velocidad del caudal.

- Calcular el gasto mediante la siguiente ecuación:

$$Q = A_T V_m$$

Donde:

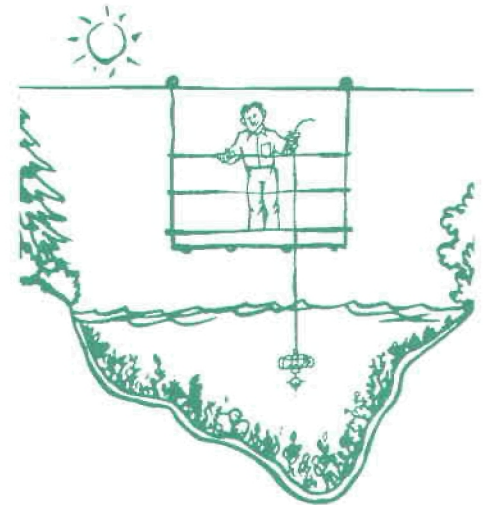
- Q = gasto del cauce, [m³/s].
- A_T = área total de la sección transversal seleccionada, [m²].

En el anexo se detalla el cálculo de secciones transversales.

1.2.2 Medición de la velocidad con molinete

El molinete es un instrumento que permite medir la velocidad de una corriente en cualquier punto a la profundidad que se desee. Si la corriente es poco profunda se instala en una varilla y cuando la corriente es profunda se monta en una sonda.

Cuando la presencia de sólidos flotantes es abundante no es recomendable el uso de molinete. Esto se debe a que los sólidos flotantes puedan interferir con el giro del rodete.



Un molinete está constituido por un rodete (propela o rueda de copas) y un dispositivo para detectar las vueltas o revoluciones del rodete.

El principio de funcionamiento es como sigue: la corriente de agua ejerce un empuje sobre el rodete y hace que gire, el número de vueltas por unidad de tiempo es directamente proporcional a la velocidad de la corriente; conforme aumenta la velocidad del agua aumenta el número de revoluciones del molinete.

El detector mide las vueltas del rodete. El número de revoluciones por unidad de tiempo se aplica en una ecuación o una gráfica y se obtiene la velocidad lineal del agua. Cada molinete

nete tiene una ecuación característica de la forma:

$$V = mN + b$$

Donde

V = velocidad del agua [m/s]
 m = pendiente [m·min/s]

N = Número de revoluciones por minuto [min⁻¹]
 b = factor de ajuste

Que se aplica en el rango de operación para el fue calibrado; por lo tanto, para que el molinete pueda usarse, el fabricante debe entregar la curva o la ecuación de operación del equipo (figura 1.4).

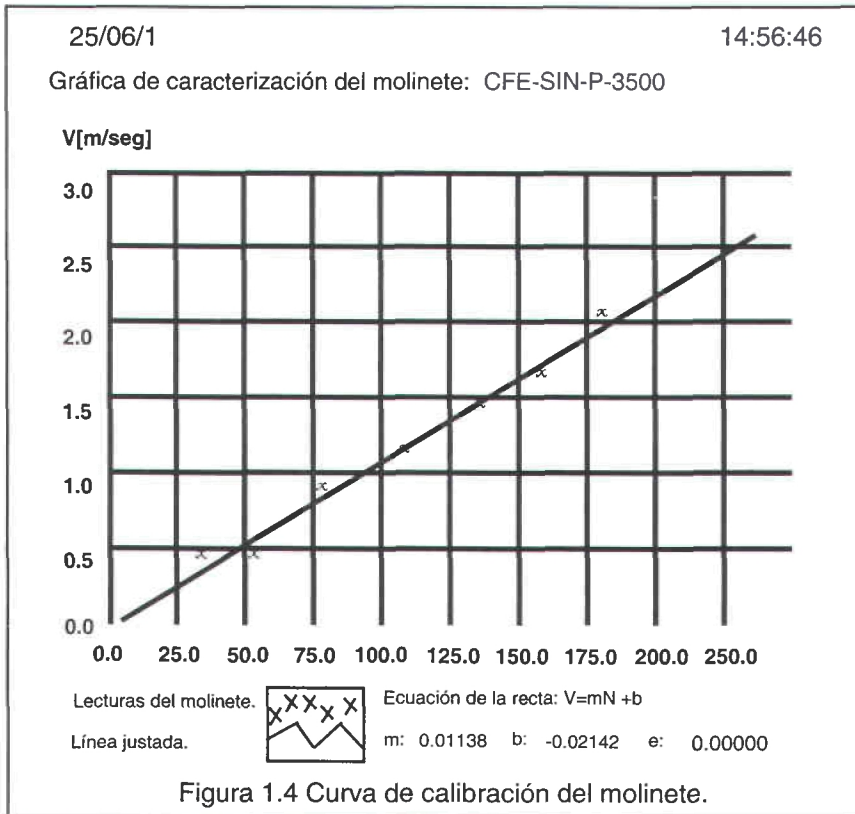
El molinete está expuesto a golpes con objetos flotantes y a un trabajo rudo que lo pueden descalibrar. Por ello y por tratarse de un instrumento de medición se debe calibrar, periódicamente, en un laboratorio certificado por la autoridad competente.

Debido a la forma de contar las revoluciones de la propela o rueda de copas, los molinetes pueden ser de tres tipos: mecánico (sistema de engranes), eléctrico (circuito eléctrico) y electrónico (circuito integrado). A continuación se describen brevemente los molinetes mecánicos y eléctricos por ser los que con más regularidad se usan.

Molinete mecánico

Este tipo de molinetes cuenta con un armazón o marco en el cual se fija el resto de los elementos que lo constituyen (figura 1.5):

- La propela localizada al extremo del eje, montada sobre una sección de cuerda sinfín, la cual es movida por el flujo del agua del cauce a medir.
- Ruedas dentadas graduadas cuyo movimiento registra el número de vueltas de la propela.
- Dispositivo elevador para acoplar y desacoplar los discos graduados.



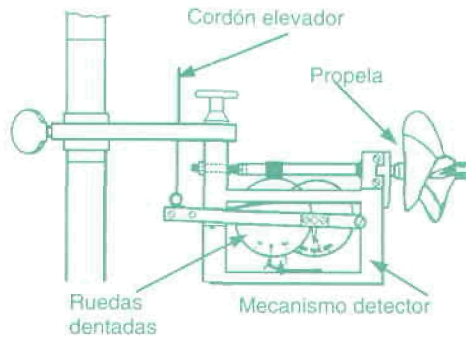


Figura 1.5 Molinete mecánico

El armado de este tipo de molinetes es muy sencillo ya que después de colocar la propela en el eje, se monta el dispositivo en una varilla y se amarra el cordón elevador para el acople y desacople de los discos graduados.

Molinete eléctrico

Este tipo de molinete se fabrica en dos tamaños, el pigmeo o enano utilizado para bajas velocidades y corrientes chicas, y el grande usado para altas velocidades y grandes corrientes. Las partes que lo constituyen son las que a continuación se describen:

La rueda de copas cuyo giro se origina por la corriente del agua.

Horquilla en donde se colocan las demás partes del molinete.

Caja de contactos donde se genera la señal proveniente de la rueda de copas.

Cruceta que sirve para fijar el dispositivo y otras piezas en la varilla.

Dependiendo del molinete, se puede contar con un timón el cual proporciona estabilidad al instrumento.

Una sonda flexible con sus terminales, una solera y un escandallo; este último, para mantener en su posición al molinete y evitar en lo posible que sea desviado de la vertical por la corriente (figura 1.6).

Audífonos necesarios para escuchar las señales que se producen en la caja de contactos.

Pila de 1.5 voltios necesaria para producir la señal en unos audífonos.

En el caso de los molinetes pigmeos, se dispone de un contacto simple en la caja de contactos la cual registra una señal por vuelta; ocasionalmente puede haber dos contactos y en este caso registra dos revoluciones por señal. Los molinetes grandes pueden disponer de un contacto simple o uno penta, el cual registra cinco vueltas por señal, que permite manejar las altas velocidades de un cauce.

Metodología para el aforo con molinete

- Antes de salir al campo verificar el buen estado mecánico del molinete y que cuente con la ecuación o la tabla de calibración correspondiente.

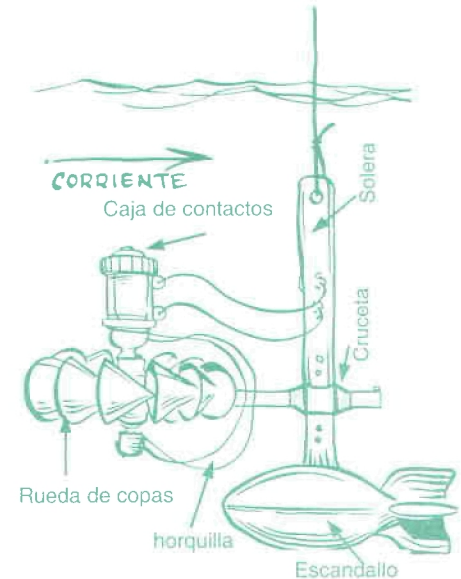


Figura 1.6 Molinete eléctrico.

- Si el molinete es eléctrico, se debe verificar que las señales recibidas sean detectadas correctamente y que las conexiones de cable y pila estén en buen estado.

-En caso de no recibir el número de señales considerado para las vueltas dadas, revisar la caja de contactos y verificar que el resorte roce la aletilla del eje de la rueda, el cual debe ser ligero para evitar que se detenga el giro del eje.

- El aforo debe realizarse en un sitio de muestreo que disponga de una sección de aforo o un puente para aforos, si no se dispone de estos recursos, seleccionar un tramo lo más recto posible y una sección transversal regular, evitando zonas con hierba, caídas rápidas, curvas, obstrucciones, puentes sostenidos por columnas y sin embalses donde el agua corra libremente.
- En algunos casos en donde el ancho de la corriente lo permita, se puede instalar en la sección transversal un puente portátil para aforos, fabricado con madera y apoyado en las paredes del canal.
- Determinar el área de la sección transversal así como la profundidad a la que se debe sumergir el molinete de acuerdo con el método seleccionado (dos, seis y ocho décimos), tal como se indica en el anexo de este manual.
- Determinar la velocidad del cauce con el molinete, tomando en consideración el punto de distribución local de las velocidades de la sección transversal que se encuentra en el anexo de este manual (páginas A – 8 y A – 9) .

- Si es necesario, utilizar un escandallo debido a la profundidad del cauce y si el arrastre provoca una desviación con respecto a la vertical de la sonda, se debe corregir la longitud del cable para compensar la desviación de su vertical como se describe en el anexo de este manual (página A–10).
- Medir el tiempo y contar las vueltas de la propela o de la rueda de copas, por lo menos tres veces en el mismo punto. Si alguna de las mediciones resulta muy diferente a las otras, hay que desecharla y volverla a realizar, enfatizando que la medición y el conteo dependen del molinete utilizado.
- Una vez obtenido el número de revoluciones o vueltas de la propela del molinete, se calcula la velocidad mediante la ecuación o tabla de calibración del molinete, como se muestra en el ejemplo siguiente.
- Una vez terminada la medición, el molinete se debe limpiar, secar con mucho cuidado y lubricar de acuerdo con las indicaciones del fabricante.
- Llenar la hoja de aforo para molinete (tabla 1.2) donde:

Distancia (m).- Es la longitud del origen al punto límite o punto de aforo; se utiliza sólo cuando se afora con canastilla en corrientes anchas.

Profundidad o tirante (m).- Es la lon-

gitud desde el nivel del agua hasta el fondo del cauce, en la columna se deben anotar todos los tirantes de las franjas (A, B y C).

Método.- Se refiere al método utilizado para medir la velocidad del cauce, los cuales pueden ser: 6/10; 2/10 y 8/10; 2/10, 6/10 y 8/10; o superficial (ver apartado 4 del anexo).

Profundidad de observación (m).- Profundidad a la que se coloca el molinete con relación a las columnas de profundidad o tirante y método.

Número de revoluciones (R).- Vueltas de la rueda de copas.

Tiempo (s).- La duración de la observación.

Revoluciones por segundo (RPS o N).- Es el resultado de dividir la columna número de revoluciones entre la columna tiempo. Esta operación se realiza cuando no se dispone de la tabla.

Velocidad en el punto (m/s).- Esta velocidad se obtiene haciendo coincidir el dato de la columna de número de revoluciones y el dato del tiempo en la tabla de calibración; otra forma es dividir primero el número de vueltas entre el tiempo y el resultado sustituirlo en la ecuación de calibración.

Coefficiente.- En caso de que la velocidad haya sido superficial se emplea el coeficiente 0.9

Velocidad media del tramo o franja (m/s).- De acuerdo al método empleado para medir la velocidad, se tendrá lo siguiente: si el método es 2/10 y 8/10, la velocidad media se obtiene promediando en este caso las dos velocidades que se tienen en la columna de velocidad en el punto. Si se escogió el de 6/10 la velocidad es la misma que en la columna de velocidad en el punto, en caso de que se considere superficial, la velocidad es el producto de la columna de velocidad en el punto y de la columna coeficiente.

Ancho medido de la sección o franja (m).- Ancho de una de las secciones que se dividió la sección transversal.

Profundidad o tirante promedio de la sección o franja (m).- El tirante pro-

medio se calcula mediante la expresión:

$$d = \frac{A + 2B + C}{4}$$

Donde:

- d = tirante promedio
- A = tirante inicial (extremo)
- B = tirante central
- C = tirante final (extremo).

Los datos de los tirantes se localizan en la columna de profundidad o tirante.

Área de la sección o franja (m²).- Es el resultado del producto de la columna ancho medido de la sección o franja y la profundidad o tirante promedio de la sección o franja.

Gasto parcial (m³/s).- Es el gasto que pasa a través de una franja seleccio-

nada y es el producto de la columna velocidad media del tramo o franja por la columna área de la sección o franja, como se indica en el punto gasto total del cauce en el anexo de este documento.

Área de la sección transversal (m²).- A_T como se denomina, es la suma de cada una de las áreas de las franjas (A_n).

Gasto total (m³/s).- Es la suma de los gastos parciales (q), es decir, la suma de todos los valores de la columna gasto parcial.

Ejemplo

Se tiene que aforar un cauce, la velocidad del agua se medirá a través de un molinete eléctrico grande cuya caja de contactos cuenta con un penta, dispositivo que emite una señal cada cinco vueltas.

Tabla 1.2 Hoja de registro del molinete.

SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD			SECCIÓN		GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES	
Distancia a punto inicial.	Profundidad.	Profundidad de observación.	Número de revoluciones.	Tiempo.	RPS.	En el punto.	Coefficiente.	Medida del tramo.	Ancho.	Profundidad.	Área.		
m	m	método m		s		m/s		m/s	m	m	m ²	m ³ /s	
TOTAL													

Las dimensiones del cauce son las que se muestran en la figura 1.7. El ancho total de la corriente, en el tramo seleccionado es de 2.78 m, mientras que la profundidad máxima es de 1.53 m. Dadas las dimensiones de la sección transversal se decidió dividirla en dos franjas. La franja 1 (figura 1.7a detalle) tiene un ancho de 1.28 m y la franja 2 mide 1.5 m de ancho (figura 1.7b detalle)

El origen o punto inicial del aforo se fija en la margen izquierda del río.

Por otra parte, la ecuación del molinete es:

$$V = 0.68 N - 0.0214$$

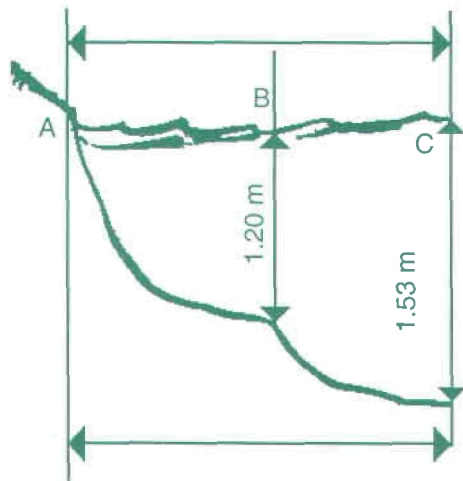


Figura 1.7a Detalle franja 1.

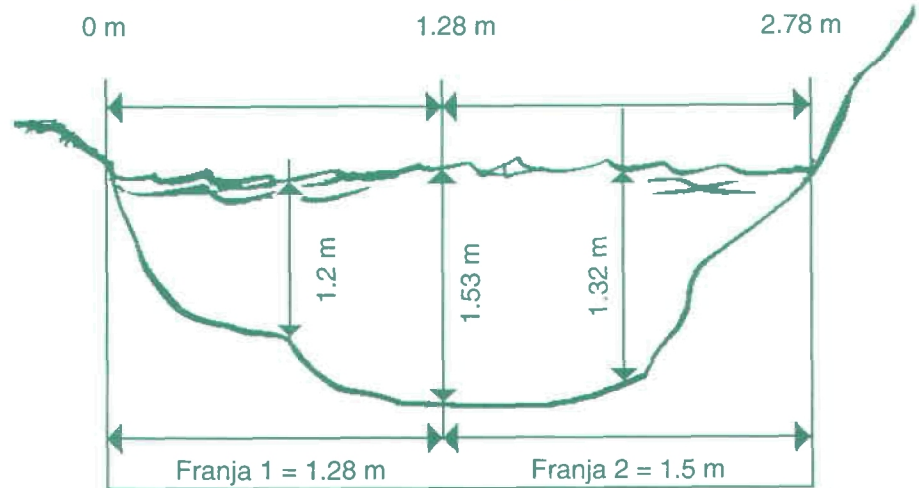


Figura 1.7 Dimensiones del cauce.

Solución del problema

Primero se determinó el tirante promedio de cada franja mediante la ecuación:

$$d = \frac{A + 2B + C}{4}$$

$$d_{\text{franja1}} = \frac{0 + 2(1.20) + 1.53}{4} = \frac{3.93}{4} = 0.98\text{m}$$

$$d_{\text{franja2}} = \frac{1.53 + 2(1.32) + 0}{4} = \frac{4.17}{4} = 1.04\text{m}$$

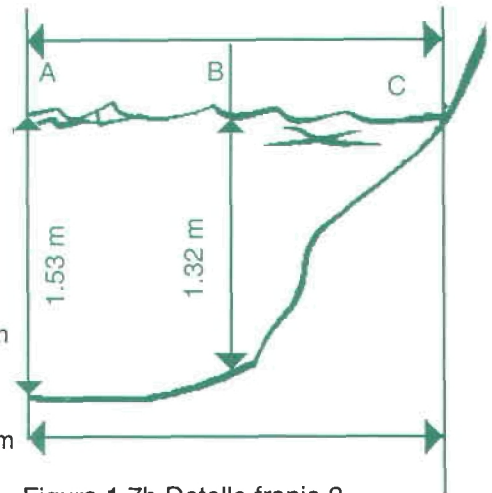


Figura 1.7b Detalle franja 2.

Se anota en la hoja de registro de molinete (tabla 1.3) los datos de las dimensiones del cauce y el tirante promedio (d) para cada franja.

Dada la profundidad del cauce se aplica el método 2/10, 8/10. En cada punto se tomaron tres mediciones y en la hoja se anotó el promedio de las tres mediciones.

Para el punto 2/10 (20 % de profundidad respecto de la superficie) de la franja 1 se obtuvieron 9 señales, como el molinete cuenta con el penta (5 vueltas por señal) se tienen 45 revoluciones, el tiempo promedio del registro fue de 46 s.

$$N = \frac{45}{46} = 0.978$$

Sustituyendo este valor en la ecuación del molinete se tiene

$$V = 0.68 (0.978) - 0.0214 = 0.644 \text{ m/s}$$

Para el punto 8/10 de la franja 1 (80% de la profundidad respecto de la superficie) se obtuvieron 8 señales en 49 segundos.

$$N = \frac{40}{49} = 0.784$$

$$V = 0.68(0.784) - 0.0214 = 0.534$$

Promediando ambas velocidades se tiene:

$$V = \frac{0.644 + 0.534}{2} = 0.589 \text{ m/s}$$

Para la franja 2 se tiene lo siguiente:

En el punto 2/10 se obtuvieron 9 señales en 45 segundos, es decir 45 revoluciones en 45 segundos

$$N = 1$$

$$V = 0.68(1) - 0.0214 = 0.659.$$

En el punto 8/10 se registraron 8 señales en 47 segundos, es decir, 40 revoluciones en 47 segundos

$$N = 0.851$$

$$V = 0.68 (0.851) - 0.0214 = 0.557.$$

La velocidad promedio queda como sigue:

$$V = \frac{0.659 + 0.557}{2} = 0.608 \text{ m/s}$$

Estos datos se registran en la hoja de registro del molinete (tabla 1.3), la velocidad promedio de cada franja se multiplica por el área transversal de su respectiva franja y se obtiene el gasto parcial. La suma de dichos gastos dan como resultado el gasto total de la corriente.

Un procedimiento alternativo para el cálculo de las velocidades es utilizar la hoja de calibración del molinete

Tabla 1.3 Ejemplo de llenado de hoja de registro del molinete.

SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
Distancia a punto inicial.	Profundidad.	Profundidad de observación.	Número de revoluciones.	Tiempo.	RPS.	En el punto.	Coefficiente.	Medida del tramo.	Ancho.	Profundidad.	Área.		
m	m	método	m	s		m/s		m/s	m	m	m ²	m ³ /s	
0.64	1.2	2/10	0.24	9*5 = 45	46	0.978	0.644		1.28	0.98	1.25		Franja 1
0.64	1.2	8/10	0.96	8*5 = 40	49	0.784	0.534	0.589	1.28	0.98	1.25	0.736	Franja 1
2.03	1.32	2/10	0.26	9*5 = 45	45	1.000	0.659		1.50	1.04	1.56		Franja 2
2.03	1.32	8/10	1.06	8*5 = 40	47	0.851	0.557	0.608	1.50	1.04	1.56	0.948	Franja 2
TOTAL												1.690	

(tabla 1.4). Se hace coincidir la columna de las revoluciones con el renglón del tiempo y se obtiene la velocidad de la corriente que son iguales a las calculadas con la ecuación del molinete. Las velocidad obtenidas mediante el uso de esta hoja, también se reportan en la hoja de registro del molinete y seguir el mismo procedimiento visto en el ejemplo.

1.2.3 Vertedores

Cuando se habla de vertedor, se entiende como una abertura o escotadura grande de forma regular practicada en la pared de un recipiente o en una pantalla (figura 1.9), colocada del tal forma que se interpone al paso de una corriente de agua para poder realizar el aforo de un caudal. Estas estructuras se basan en el funcionamiento de una sección hidráulica conocida y calibrada, de tal forma que con sólo conocer la carga hidráulica de operación se determine el gasto que pasa por dicha sección.

Dependiendo de la forma de la abertura, se tienen un gran número de

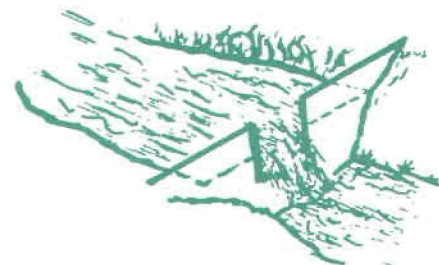


Figura 1.9 Vertedor.

vertedores que pueden ser: rectangulares, triangulares, trapeciales y proporcionales. Los vertedores que más frecuentemente se utilizan son los rectangulares, los triangulares y los proporcionales.

Tabla 1.4 Ejemplo de una tabla de calibración de un molinete.

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA																							
Fecha 25/06/01			Coordinación de Tecnología Hidráulica Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos																				
Tabla de Velocidades																							
Ecuación $V = m \cdot N + b$																							
m (mts/rev.):		b:		V = metros/segundo						T = segundos						Número de reporte				Clave del molinete			
0.68		-0.0214		N = Revoluciones por segundo						R = Número de revoluciones						3500				CFE-SIN-P-3500			
T/R	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200	250			
45	0.024	0.039	0.054	0.130	0.205	0.281	0.356	0.432	0.507	0.583	0.659	0.734	0.885	1.036	1.187	1.339	1.490	2.245	3.001	3.756			
46	0.023	0.038	0.053	0.126	0.200	0.274	0.348	0.422	0.496	0.570	0.644	0.718	0.866	1.013	1.161	1.309	1.457	2.196	2.935	3.674			
47	0.022	0.036	0.051	0.123	0.196	0.268	0.340	0.413	0.485	0.557	0.630	0.702	0.847	0.991	1.136	1.281	1.425	2.149	2.872	3.596			
48	0.021	0.035	0.049	0.120	0.191	0.262	0.333	0.404	0.474	0.545	0.616	0.687	0.829	0.970	1.112	1.254	1.395	2.104	2.812	3.520			
49	0.020	0.034	0.048	0.117	0.187	0.256	0.326	0.395	0.464	0.534	0.603	0.672	0.811	0.950	1.089	1.228	1.366	2.060	2.754	3.448			

Las partes que integran un vertedor (figura 1.10) son las que a continuación se indican:

Cresta del vertedor.- Es el borde o superficie sobre la que se vierte el agua.

Manto.- Lámina de agua que derrama por encima de la cresta.

Carga (h).- Es la altura del agua que produce el vertedor.

Para realizar el aforo con vertedores es preciso cumplir con las siguientes condiciones:

La carga (h) del caudal debe medirse

en una zona de régimen tranquilo, colocando la escala de medición a una distancia mínima de cuatro veces la carga o sea (4h) aguas arriba de la cresta del vertedor.

La carga mínima para tener lecturas precisas es de 6 cm (ver anexo).

Se recomienda que la corriente llegue al vertedor sin velocidad, como máximo $V = 0.4 \text{ m/s}$; en caso de que exceda este valor se deben realizar los ajustes necesarios para estar dentro de este valor.

La profundidad de la pantalla debe ser una distancia mayor de tres veces la carga máxima (3h) sobre el vertedor.

1.2.3.1 Vertedor rectangular

El vertedor rectangular es la estructura más usual destinada para medir el gasto en los canales, el cual está constituido por una pantalla de cresta biselada instalada en el cauce de un canal rectangular. Es de primordial importancia que la pantalla sea colocada verticalmente, normal al canal y con la cresta en perfecto estado horizontal. Este tipo de vertedor suele llamarse *sin contracciones laterales*, debido a que su cresta alcanza ambas paredes (figura 1.11).

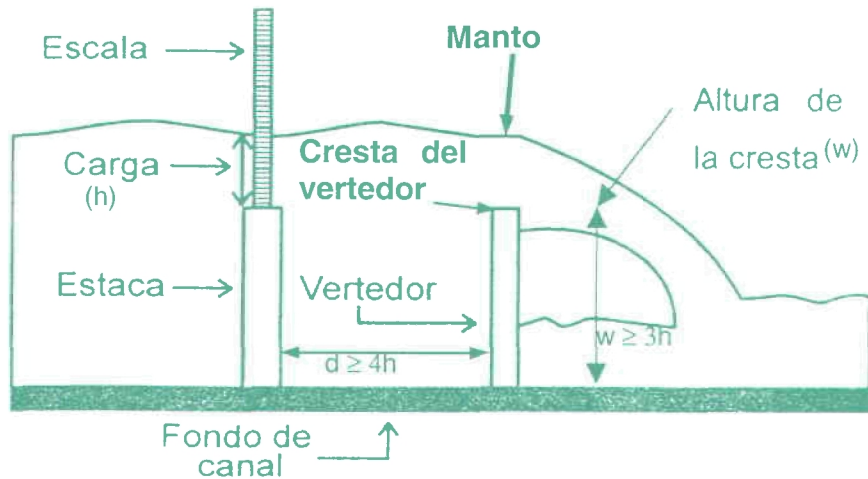
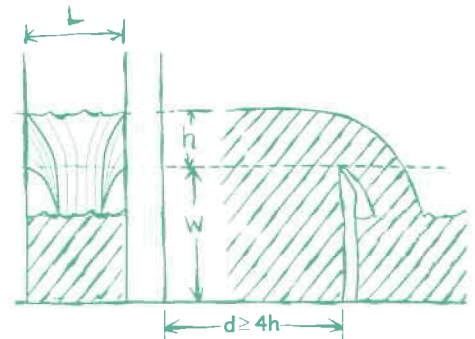


Figura 1.10 Partes del vertedor.



Para obtener la descarga sobre el vertedor se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$Q = CL\sqrt{h^3}$$

Donde:

Q = Gasto, [m³/s]

C = Coeficiente de descarga que depende del perfil de la parte superior del vertedor, para este caso el valor es de 1.84.

L = Ancho del canal o longitud de la cresta, [m]

h = Carga hidráulica sobre la cresta del vertedor, [m]

Sustituyendo el valor del coeficiente (C) en la ecuación, se tiene que:

$$Q = 1.84L\sqrt{h^3}$$

Cerca de la cresta, la corriente se acelera precipitándose hacia la caída, por lo que el tirante se va abatiendo. Debido a ello se recomienda realizar la medición aguas arriba de la cresta a una distancia mayor o igual que 3.5 veces la carga máxima. En este punto es donde se conecta el bote de la escala de gancho (figura 1.12) para la determinación de h , como se describe en el anexo (página A-11).

En caso de que en el canal el agua corra con velocidad considerable, se debe agregar a h la carga de velocidad correspondiente y la ecuación anterior se transformará en la siguiente:

$$Q = 1.84L\sqrt{H^3}$$

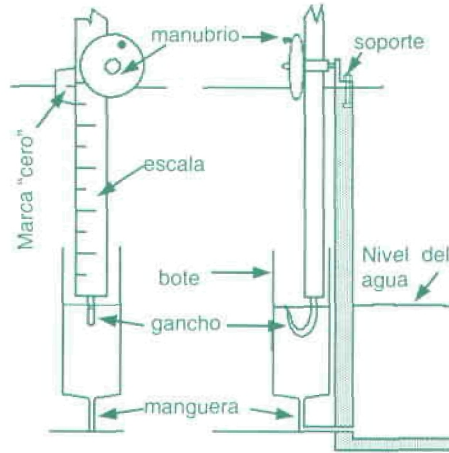


Figura 1.12 Escala de gancho.

H se calcula de la siguiente forma:

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g}$$

V_0 = Velocidad de llegada, [m/s]

h = Carga, [m]

g = 9.81 m/s²

Ejemplo

Se tiene instalado un vertedor rectangular en un canal de longitud de cresta de 0.80 m, cuya carga aguas arriba es de 0.084 m, la velocidad de llegada del agua es 0.99 m/s; se desea obtener el gasto del caudal correspondiente.

$L = 0.80$ m.

$h = 0.084$ m.

$V_0 = 0.99$ m/s.

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g} = 0.084 + \frac{0.99^2}{2(9.81)} = 0.133$$

substituyendo este valor en la ecuación de vertedores rectangulares sin contracciones se tiene:

Por lo tanto:

$$Q = 1.84(0.80)\sqrt{0.133^3} = 0.072 \text{ m}^3/\text{s}$$

$Q = 72$ L/s

1.2.3.2 Vertedor rectangular con contracción lateral

A estos vertedores se les considera como de diafragma, cuya cresta no alcanza las paredes del canal ya que la corriente del caudal los cruza a través de una escotadura cuyos lados están restringidos (figura 1.13).

Para el cálculo del gasto se utiliza, en principio, la ecuación de los vertedores sin contracción. En dicha ecuación se modifica el ancho de la cresta (L), restándole 20% de la carga h , debido a la contracción. La ecuación queda así:

$$Q = 1.84(L - 0.20h)\sqrt{h^3}$$

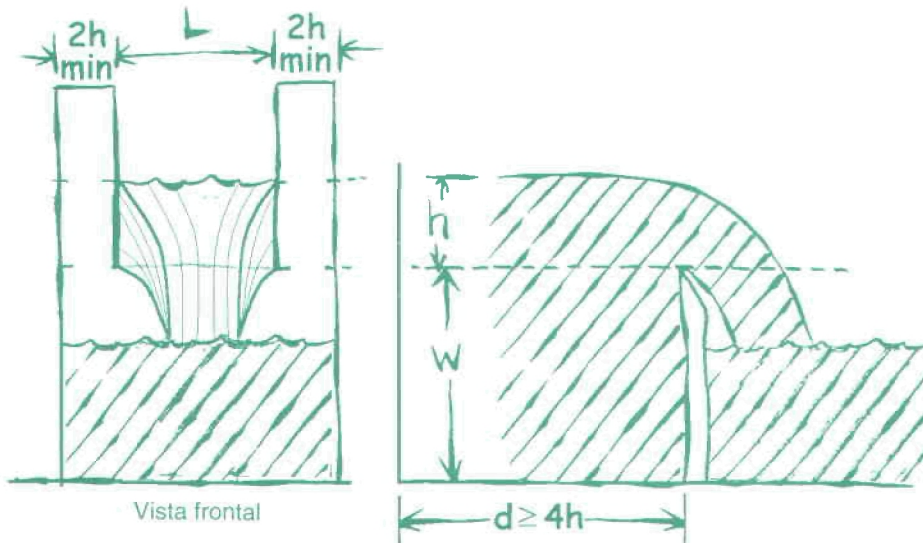


Figura 1.13 Vertedor rectangular con contracciones.

Ejemplo

En un canal se tiene instalado un vertedor rectangular con contracciones y se desea determinar el caudal que pasa por dicho canal, para ello se tienen los siguientes datos: la longitud de la cresta es de 40 cm; la carga aguas arriba es de 15 cm.

Substituyendo los valores en la ecuación anterior se tiene:

$$Q = 1.84 (0.40 - 0.20 (0.15)) \sqrt{(0.15)^3}$$

$$Q = 0.0396 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 39.6 \text{ L/s.}$$

1.2.3.3 Vertedor triangular

Los vertedores triangulares cuentan con una escotadura triangular como se muestra en la figura 1.14.

Los vertedores triangulares son los más apropiados para la medición de gastos pequeños, ya que sólo se toma en cuenta la carga hidráulica (h) y el ángulo de abertura del vertedor que puede ser de 45°, 60°, 90° o

120°. Los vertedores triangulares pueden ser de diversos materiales, tales como hierro, aluminio, concreto o la combinación de estos u otros materiales.

La ecuación básica para el cálculo del caudal de un vertedor triangular es la siguiente:

$$Q = C \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$$

Donde:

- Q= Gasto, [m³/s]
- C= Coeficiente de descarga (adimensional)
- h= Carga sobre el vértice, [m]
- θ= Ángulo de la escotadura

Para un vertedor triangular el coeficiente de descarga es aproximadamente de 1.38, por lo que la ecuación general de los vertedores triangulares como sigue:

$$Q = 1.38 \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$$

Ejemplo

Se cuenta con un vertedor triangular de 90° de abertura en un canal; se requiere obtener el gasto si se tiene una carga de 20 cm sobre el vértice del vertedor.

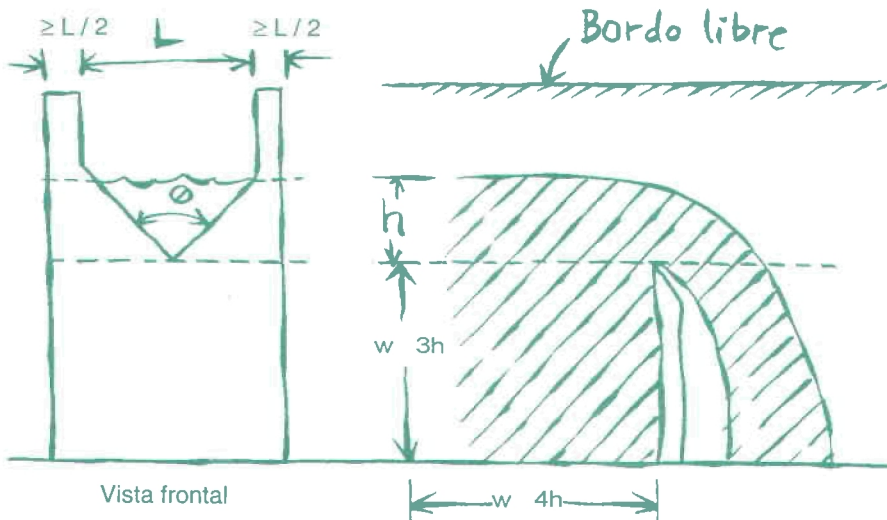


Figura 1.14 Vertedor triangular

Partiendo de la ecuación anterior y sustituyendo el valor del ángulo y la carga se tiene:

$$Q = 1.38 \tan \frac{90^\circ}{2} (0.20)^{5/2} = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 23 \text{ L/s.}$$

1.3 Conductos

1.3.1 Descarga libre

1.3.1.1 Volumen tiempo

Para realizar la medición directa puede usarse un depósito portátil o fijo previamente calibrado por volumen. Es conveniente usar el depósito portátil cuando la corriente cae en forma de chorro en un área reducida y la velocidad del chorro es pequeña. Para realizar la medición se debe introducir rápidamente el recipiente cali-

brado, por debajo de la corriente y medir el tiempo que tarda en llegar a la marca de volumen conocido (figura 1.15). Se obtiene el gasto dividiendo el volumen marcado en el recipiente calibrado entre el tiempo de llenado.



Figura 1.15 Aforo por método volumen-tiempo.

Se repite el procedimiento tres veces, las variaciones entre las tres lecturas no puede ser mayor al 10%, si se tienen variaciones mayores a ese mar-

gen hay que desechar la lectura más alejada del promedio y se hace una nueva medición. Una vez obtenidas las lecturas se promedian los valores.

Para calibrar los depósitos portátiles se debe utilizar una probeta clase A, certificada por un laboratorio de pruebas. Se llena la probeta con agua hasta el máximo nivel de aforo y se vacía en el recipiente que se utilizará para la medición. En el nivel al que llegue el agua se hace una marca visible con línea delgada y se repite la operación hasta llegar al nivel máximo del recipiente. Otra alternativa es llenar un recipiente sin calibrar e ir vaciando el agua en la probeta certificada hasta terminar de medir el volumen captado.

En el caso de un recipiente fijo o tanque, se procede de la misma forma con la aclaración de que el recipiente debe tener diversas marcas calibradas para conocer el volumen que cada una de esas marcas representa.

1.3.1.2 Escuadra

Hay veces que las descargas se realizan a través de tubos horizontales hacia los cuerpos de agua. Si este es el caso, puede haber dos condiciones: la primera de ellas es cuando el tubo descarga lleno y, la segunda, cuando el tubo descarga parcialmente lleno. En ambos casos se mide una distancia o componente horizon-

tal (L) y una vertical (Y). La componente horizontal se mide desde la cúspide del interior del tubo hasta el punto de intersección con la componente vertical, la cual se mide a partir de este punto hasta donde el chorro cae en forma vertical (figura 1.16).

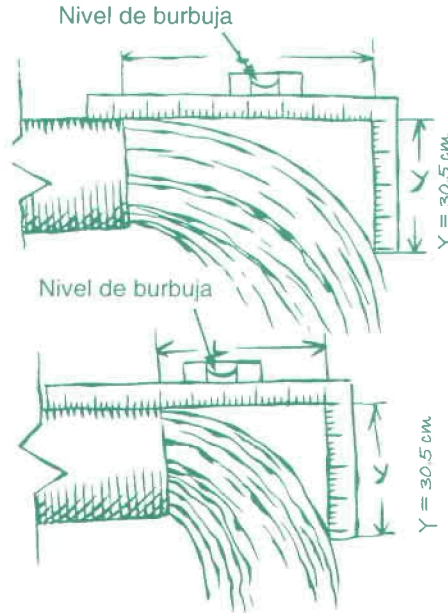


Figura 1.16 Aforo con escuadra a tubo lleno.

Para medir ambas componentes (L, Y) se utiliza una escuadra cuyo lado menor, o sea la componente vertical

(Y), tiene una longitud de 30.48 cm.

El caudal se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = 0.0039 L A$$

Donde:

$$Q = \text{gasto,} \quad [L/s]$$

$$L = \text{Componente horizontal,} \quad [cm]$$

$$A = \text{Área del tubo} = 3.1416 r^2, \quad [cm^2]$$

$$r = \text{Radio del tubo,} \quad [cm]$$

Tubo lleno

Para el aforo de la descarga de un tubo lleno, se coloca la escuadra sobre el tubo, se coloca un nivel de burbuja sobre la escuadra para verificar que se encuentre en posición horizontal; se desliza la escuadra hasta encontrar la intersección entre la componente vertical de la escuadra y la caída del chorro en forma vertical (figura 1.16).

Ejemplo

Determinar el gasto de un tubo horizontal lleno que descarga en un cuerpo receptor. El diámetro interior del tubo de 15.24 cm y la longitud de descarga (X) de 70 cm.

Donde:

$$D = 15.24 \text{ cm}$$

$$r = 7.62 \text{ cm}$$

$$L = 70.0 \text{ cm}$$

$$A = 3.1416r^2 = 3.1416(7.62)^2$$

$$A = 182.40 \text{ cm}^2$$

Como

$$Q = 0.0039 L A$$

$$Q = 0.0039 (70) (182.40) = 49.79 \text{ L/s}$$

Tubo parcialmente lleno

En caso de que un tubo horizontal descargue parcialmente lleno se procede como si se calculara la descarga de un tubo horizontal lleno; además se debe medir el valor del tirante del agua (X) que es la distancia entre la pared inferior del tubo hasta la superficie del agua (figura 1.17).

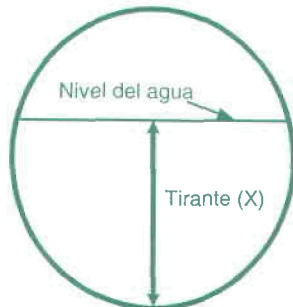


Figura 1.17 Tirante del tubo parcialmente lleno.

Con este valor y el diámetro interior del tubo (D) se obtiene la relación X/D. Con esta relación se ingresa a la tabla 1.2, y se obtiene el porcentaje (%) del área con respecto al tubo lleno, se transforma a decimal (%/100) y finalmente se multiplica por el gasto a carga llena para obtener el gasto correspondiente.

Ejemplo

Se quiere determinar el gasto de la descarga de un tubo horizontal parcialmente lleno con un diámetro interior de 20.32 cm, una componente horizontal de 64 cm y un tirante de 14.5 cm.

Tabla 1.2 Porcentaje del área mojada del tubo de descarga

X/D	%	X/D	%	X/D	%	X/D	%
0.01	0.17	0.26	20.66	0.51	51.27	0.76	81.54
0.02	0.47	0.27	21.79	0.52	52.55	0.77	82.62
0.03	0.88	0.28	22.92	0.53	53.82	0.78	83.68
0.04	1.34	0.29	24.06	0.54	55.09	0.79	84.78
0.05	1.87	0.30	25.24	0.55	56.35	0.80	85.77
0.06	2.44	0.31	26.41	0.56	57.63	0.81	86.77
0.07	3.08	0.32	27.59	0.57	58.89	0.82	87.76
0.08	3.74	0.33	28.78	0.58	60.13	0.83	88.73
0.09	4.46	0.34	29.98	0.59	61.40	0.84	89.67
0.10	5.21	0.35	31.32	0.60	62.64	0.85	90.59
0.11	5.96	0.36	32.42	0.61	63.89	0.86	91.49
0.12	6.80	0.37	33.64	0.62	65.13	0.87	92.36
0.13	7.64	0.38	34.87	0.63	66.36	0.88	93.20
0.14	8.51	0.39	36.11	0.64	67.58	0.89	94.02
0.15	9.41	0.40	37.06	0.65	68.81	0.90	94.79
0.16	10.33	0.41	38.6	0.66	70.02	0.91	95.54
0.17	11.27	0.42	39.85	0.67	71.72	0.92	92.26
0.18	12.24	0.43	41.11	0.68	72.41	0.93	97.30
0.19	13.23	0.44	42.37	0.69	75.99	0.94	97.56
0.20	14.23	0.45	43.65	0.70	74.76	0.95	98.13
0.21	15.27	0.46	44.91	0.71	75.95	0.96	98.66
0.22	16.31	0.47	46.18	0.72	77.08	0.97	99.12
0.23	17.38	0.48	47.45	0.73	78.21	0.98	99.52
0.24	18.45	0.49	48.73	0.74	79.34	0.99	99.88
0.25	19.54	0.50	50.00	0.75	80.44	1.0	100.0

$$Q = 0.0039 \text{ L A}$$

Donde:

$$D = 20.32 \text{ cm}$$

$$r = 10.16 \text{ cm}$$

$$L = 64.0 \text{ cm}$$

$$A = 3.1416r^2 = 3.1416(10.16)^2$$

$$A = 324.29 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto:

$$Q = 0.0039(64)(324.29) = 80.94 \text{ L/s}$$

Conociendo el valor del tirante del agua, $X = 14.5 \text{ cm}$ se podrá obtener la relación X/D como sigue:

$$R = X/D = 14.5/20.32 = 0.71$$

El valor de R se ingresa en la tabla 1.2 para obtener el porcentaje de área con respecto a tubo lleno, resultando 75.95 %, por lo que el gasto se obtiene transformando este porcentaje a fracción decimal y, finalmente, se multiplica por el gasto a tubo lleno para obtener el gasto para tubo descargando parcialmente lleno, como sigue:

$$Q = 80.94 \left(\frac{75.95}{100} \right) = 61.48 \text{ L/s}$$

1.4 Descarga sumergida

El aforo de una descarga sumergida se puede llevar a cabo mediante distintos métodos. Idealmente, se debe

contar con algún dispositivo de medición, previamente instalado, que permita medir la presión en la tubería o la velocidad.

Sólo cuando se tenga que hacer la medición al final del tubo se recomienda lo siguiente:

Aforo con molinete, acercando lo más posible el equipo (de preferencia un micromolinete) a la boca del tubo, pero evitando que toque las paredes del mismo. Mientras más cerca esté de la descarga del tubo, menor será la interferencia de la corriente del cuerpo de agua (suponiendo que sea un río).

Comercialmente se encuentra el equipo que se muestra en la figura 1.18. El principio de aplicación sería el mismo que el de un molinete. Su ventaja radica en que la corriente perpendicular (del río) no interfiere con las revoluciones de la propela.

Otra alternativa sería inyectar algún trazador en algún punto del tubo de descarga y medir el tiempo que tarda en salir. Claro que para esto se requiere cierta claridad del cuerpo de agua y que la profundidad no sea mucha.

Tanto para el uso del molinete como para el trazador es indispensable conocer el diámetro del tubo para calcular el área transversal, de tal forma que se aplique la siguiente fórmula:

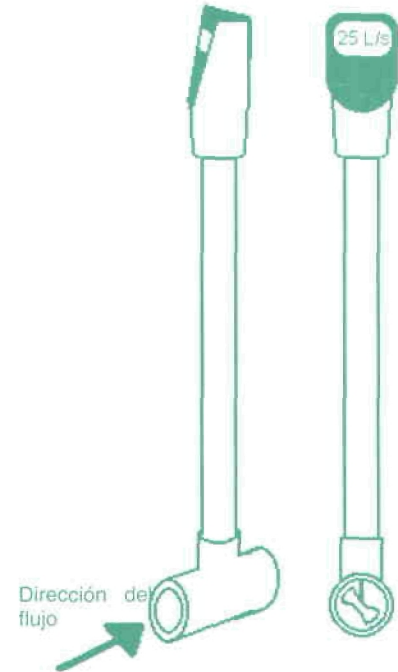


Figura 1.18 Medidor de flujo.

$$Q = V \cdot A.$$

1.5 Descarga subterránea

La fosa séptica de una vivienda recibe el agua de los inodoros, su efluente se evacua por un tubo de desagüe que vierte a un registro. En este punto, se junta con las aguas jabonosas (provenientes de los lavabos, fregaderos y lavaderos), de ahí se envía a

un pozo de absorción o un campo de oxidación (figura 1.19). Este tipo de descarga se considera como subterránea.

Para medir el caudal en una descarga subterránea el sitio más adecuado es el registro (figura 1.19). El método volumen-tiempo es el recomendado para obtener el gasto de la fosa séptica (apartado 1.3.1.1).

Como ya se mencionó, el método es efectivo si los chorros son pequeños y de poca velocidad, ya que de lo contrario se pueden presentar errores por una falta de apreciación en el instante mismo de la medición.

Otra alternativa es contar con un verdedor triangular, el inconveniente es

que si el caudal no es suficiente como para elevar la carga hidráulica por lo menos 6 cm por arriba del vértice de la escotadura, la medición no es confiable.

2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS PROPORCIONALES A LOS CAUDALES

Al término de esta unidad el usuario será capaz de explicar el procedimiento para calcular, con base en el caudal de agua residual que se descarga a un cuerpo receptor, y preparar una muestra compuesta.

Toda muestra tomada de cualquier descarga de agua residual durante una visita de inspección y verificación tiene como fin último ser una medida representativa y confiable de las características del agua residual.

Las muestras pueden ser simples, promedio y compuestas, siendo las primeras una porción tomada de una descarga de aguas residuales, la cual permite conocer la concentración de los parámetros del agua en un momento dado. La muestra promedio es el promedio aritmético de los volúmenes de varias muestras simples recolectadas a diferentes intervalos de tiempo. En el caso de una muestra compuesta, es el resultado de mezclar los volúmenes de varias muestras simples, en forma proporcional al caudal en el momento en que se tomó cada muestra.

Con el fin de mostrar la forma de preparar una muestra compuesta, a continuación se plantea una situación real en campo donde se desea determinar si los parámetros de descarga de aguas residuales a un cuerpo receptor cumplen con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas vigentes.

Ejemplo 1.

Se lleva a cabo una visita de inspección a una industria química. La des-

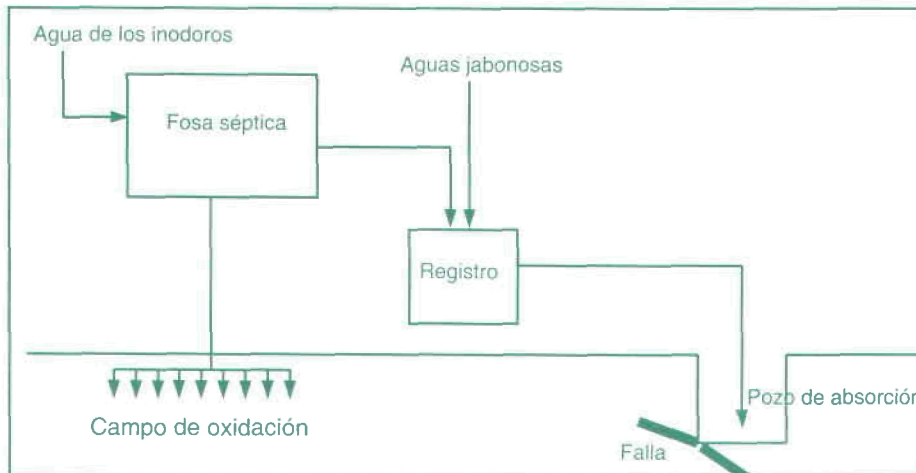


Figura 1.19 Descarga subterránea.

carga de agua residual al cuerpo receptor se hace a través de una tubería de 6 pulgadas de diámetro cuya caída es accesible para el muestreador.

La industria trabaja las 24 horas del día, por lo que el intervalo de recolección para cada muestra simple se determinó con base en la tabla 2.1.

Se deben tomar seis muestras simples con un intervalo entre cada toma de 4 horas. Los datos deben asentarse en formato FCNA que se diseñó para los cálculos que se realizan para la preparación de las muestras compuestas (ver anexo).

- Se tomaron muestras simples de 5 litros cada una con el fin de poder preparar una muestra compuesta. Estas muestras simples se preservan conforme a los procedimientos correspondientes y, una vez hechas las muestras compuestas, se verifica el pH.

Tabla 2.1 Frecuencia de muestreo.

Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
		Mínimo N.E.	Máximo N.E.
Menor que 4	Mínimo 2	-----	-----
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

- Dada la facilidad de poder medir el caudal directamente a la salida del tubo de 6 pulgadas que descarga el agua residual, se decidió medir el caudal directamente a la salida del tubo por el método volumen tiempo, con los datos obtenidos se calculó el caudal, a partir de la siguiente ecuación.

$$Q_i = \text{Volumen (L)/tiempo (s)}$$

La tabla 2.2 presenta los volúmenes medidos con sus respectivos tiempos y los caudales obtenidos.

Una vez conocidos los caudales puntuales de la descarga y determinado el caudal total se está en condiciones de calcular la aportación proporcional correspondiente a cada muestra puntual para preparar la muestra compuesta.

Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

Tabla 2.2 Caudal de las muestras puntuales.

HORA	VOLUMEN (L)	TIEMPO (s)	Q_i (L/s)
08:00	15.2	37.0	0.410
12:00	15.7	34.0	0.462
16:00	15.7	27.0	0.570
20:00	15.9	28.9	0.550
24:00	15.4	26.5	0.581
04:00	15.4	27.0	0.570
$\Sigma Q_i = Q_i$			3.143

$$VMS_i = VMC \times (Q_i/Q_i)$$

Donde:

VMS_i = volumen de cada una de las muestras simples "i" [L].

VMC = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos [L].

Q_i = caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple [L/s].

$Q_i = \Sigma Q_i$ = Sumatoria de cada uno de los gastos, [L/s].

Los volúmenes recomendados para cada uno de los parámetros exigidos por la NOM-ECOL-001-1996 se presentan en la tabla 2.3, asimismo, se indican las condiciones de preservación.

Tabla 2.3 Parámetros de muestreo que requieren muestra compuesta.

Parámetro	Volumen mínimo requerido (Litros)	Preservación
<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos sedimentables • Sólidos suspendidos totales 	3	4°C
• Nitrógeno total	1	H ₂ SO ₄ pH < 2 4°C
• Metales	1	HNO ₃ pH < 2 4°C
• Cianuros	1	NaOH pH > 12 4°C
• DBO	1	4°C

A partir de los caudales medidos durante el muestreo (tabla 2.2), y de los volúmenes mínimos requeridos (tabla 2.3) se calculan las aportaciones de las muestras simples para preparar cada una de las cinco muestras compuestas.

Para sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y fósforo se requieren tres litros de muestra, por lo tanto VMC = 3 L.

La tabla 2.4 presenta los resultados de los caudales proporcionales.

Tabla 2.4 Aportación proporcional de las muestras puntuales.

VMC	Q _i	Q _t	Q _i /Q _t	VMC*(Q _i /Q _t)
3	0.410	3.143	0.131	0.393
3	0.462	3.143	0.147	0.441
3	0.570	3.143	0.181	0.543
3	0.550	3.143	0.175	0.525
3	0.581	3.143	0.185	0.555
3	0.570	3.143	0.181	0.543
ΣQ _i	3.143		ΣVMC*(Q _i /Q _t)	3.000

Cada uno de los siguientes parámetros requiere una muestra compuesta de 1 litro cada una (VMC = 1 L): nitrógeno total, metales pesados, cianuros y DBO. La tabla 2.5 muestra las aportaciones proporcionales para preparar una muestra de un litro.

Tabla 2.5 Aportación proporcional de las muestras puntuales

VMC	Q _i	Q _t	Q _i /Q _t	VMC*(Q _i /Q _t)
1	0.410	3.143	0.131	0.131
1	0.462	3.143	0.147	0.147
1	0.570	3.143	0.181	0.181
1	0.550	3.143	0.175	0.175
1	0.581	3.143	0.185	0.185
1	0.570	3.143	0.181	0.181
ΣQ _i	3.143		ΣVMC*(Q _i /Q _t)	1.000

Finalmente los cálculos obtenidos deben registrarse en el Formato FCNA CONTROL INTERNO DEL MUESTREO PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS, el cual se refiere a los cálculos para formar

muestras compuestas. En la página siguiente se muestra dicho formato lleno con los datos aquí analizados.

CONTROL INTERNO DEL MUESTREO

FORMATO DE LOS CÁLCULOS PARA LAS MUESTRAS COMPUESTAS

PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS POR MEDIO DE LA ECUACIÓN: $VMS = VMC(Q/Q_i)$

DONDE:

VMS = Volumen necesario de cada una de las muestras para preparar una compuesta, litros.

VMC = Volumen necesario de la muestra compuesta para realizar los análisis, litros.

Q_i = Gasto en el momento de la toma de la muestra (i), litros por segundo.

Q_t = ΣQ_i = Sumatoria de cada uno de los gastos, litros por segundo.

NOMBRE COMPLETO O RAZÓN SOCIAL DE LA PERSONA Industrias patito S. DE R. L.					
IDENTIFICACIÓN DE LA DESCARGA					
FECHA	HORA DE PREPARACIÓN 4:30 am.		PERSONA QUE CALCULÓ Francisco Bienhecho		
PARÁMETROS A DETERMINAR Sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y fósforo total.					
HORA	Q_i	Q_t	VMC	(Q/Q_i)	VMS
8:00	0.410	3.143	3.0	0,131	0,393
12:00	0.462	3.143	3.0	0,147	0,441
16:00	0.570	3.143	3.0	0,181	0,543
20:00	0.550	3.143	3.0	0,175	0,525
24:00	0.581	3.143	3.0	0,185	0,555
4:00	0.570	3.143	3.0	0,181	0,543
ΣQ_i	3.143			ΣVMS_i	3,000

FECHA	HORA DE PREPARACIÓN: 4:35 am.		PERSONA QUE CALCULÓ: Francisco Bienhecho		
PARÁMETROS A DETERMINAR: Nitrógeno total, metales pesados, cianuros y DBO.					
HORA	Q_i	Q_t	VMC	(Q/Q_i)	VMS
8:00	0.410	3.143	1.0	0.130	0.130
12:00	0.462	3.143	1.0	0.147	0.147
16:00	0.570	3.143	1.0	0.181	0.181
20:00	0.550	3.143	1.0	0.175	0.175
24:00	0.581	3.143	1.0	0.185	0.185
4:00	0.570	3.143	1.0	0.181	0.181
ΣQ_i	3.143			ΣVMS_i	1.000

Ejemplo 2

Suponiendo que la misma empresa en lugar de trabajar las 24 horas al día trabaja 8 horas, se deben tomar cuatro muestras simples con un intervalo entre cada toma de 3 horas (ver tabla 2.1).

Como son las mismas condiciones de descarga, se decidió medir el caudal directamente a la salida del tubo por medio del método de la cubeta, obteniéndose los datos y resultados de la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Caudal de las muestra puntuales.

HORA	VOLUMEN (L)	TIEMPO (s)	Qi (L/s)
8:00	15.2	37	0.410
11:00	15.7	34	0.462
14:00	15.7	27	0.570
17:00	15.9	28.9	0.550
		ΣQ_i	1.992

A partir de los caudales medidos durante el muestreo (tabla 2.2), y de los volúmenes mínimos requeridos (tabla 2.3) se calculan las aportaciones de las muestras simples para preparar cada una de las cinco muestras compuestas.

Para sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y fósforo se requieren tres litros de muestra, por lo tanto $VMC = 3$ L.

La tabla 2.7 presenta los resultados de los caudales proporcionales.

Tabla 2.7 Aportación proporcional de las muestras puntuales.

VMC	Q_i/Q_t	$VMC*(Q_i/Q_t)$
3	0.206	0.618
3	0.232	0.696
3	0.286	0.858
3	0.276	0.828
	$\Sigma VMC*(Q_i/Q_t)$	3.000

Cada uno de los siguientes parámetros requiere una muestra compuesta de 1 litro cada una ($VMC = 1$ L): nitrógeno total, metales pesados, cianuros y DBO. La tabla 2.8 muestra las aportaciones proporcionales para preparar una muestra de un litro.

Tabla 2.8 Aportación proporcional de las muestras puntuales.

VMC	Q_i/Q_t	$VMC*(Q_i/Q_t)$
1	0.206	0.206
1	0.232	0.232
1	0.286	0.286
1	0.276	0.276
	$\Sigma VMC*(Q_i/Q_t)$	1.000

Finalmente los cálculos obtenidos deben registrarse en el Formato FCNA CONTROL INTERNO DEL MUESTREO PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS, el cual se refiere a los cálculos para formar muestras compuestas. En la página siguiente se muestra dicho formato lleno con los datos aquí analizados.

CONTROL INTERNO DEL MUESTREO

FORMATO DE LOS CÁLCULOS PARA LAS MUESTRAS COMPUESTAS

PREPARACIÓN DE MUESTRAS COMPUESTAS POR MEDIO DE LA ECUACIÓN: $VMS = VMC(Q/Q_i)$

DONDE:

VMS= Volumen necesario de cada una de las muestras para preparar una compuesta, litros.

VMC= Volumen necesario de la muestra compuesta para realizar los análisis, litros.

Q_i = Gasto en el momento de la toma de la muestra (i), litros por segundo.

$\sum Q_i$ =Sumatoria de cada uno de los gastos, litros por segundo.

NOMBRE COMPLETO O RAZÓN SOCIAL DE LA PERSONA Industrias patito S. DE R. L.					
IDENTIFICACIÓN DE LA DESCARGA					
FECHA	HORA DE PREPARACIÓN 17:30		PERSONA QUE CALCULÓ Francisco Bienhecho		
PARÁMETROS A DETERMINAR Sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y fósforo total.					
HORA	Q_i	Q_t	VMC	(Q/Q_i)	VMS
8:00	0.410	1.992	3.0	0.206	0.618
11:00	0.462	1.992	3.0	0.232	0.696
14:00	0.570	1.992	3.0	0.286	0.858
17:00	0.550	1.992	3.0	0.276	0.828
	$\sum Q_i$	1.992		$\sum VMS_i$	3,000

FECHA	HORA DE PREPARACIÓN		PERSONA QUE CALCULÓ		
PARÁMETROS A DETERMINAR					
HORA	Q_i	Q_t	VMC	(Q/Q_i)	VMS
8:00	0.410	1.992	1.0	0.206	0.206
11:00	0.462	1.992	1.0	0.232	0.232
14:00	0.570	1.992	1.0	0.286	0.286
17:00	0.550	1.992	1.0	0.276	0.276
	$\sum Q_i$	1.992		$\sum VMS_i$	1.000

RESUMEN

Para que el aforo de una descarga sea confiable, el método de medición y el tipo de medidor se deben adaptar a las características físicas de la descarga y a la composición del agua residual. Idealmente, el medidor seleccionado no debe variar su precisión por temperaturas de 40°C o mayores, altas concentraciones de sólidos suspendidos no deben interferir con su desempeño. Asimismo, deben ser portátiles y fáciles de adaptar en el campo. Las opciones que tienen los medidores para aforar las descargas son limitadas y se reducen a:

Método área – velocidad con flotador. En este caso es necesario conocer la sección transversal del canal y se mide la velocidad con un flotador que puede estar hecho con corcho y tornillos o cualquier otro objeto flotante y que no sea voluminoso. Se selecciona un tramo recto de, al menos, 10 metros de longitud y se realiza la medición tres veces. La velocidad del efluente se calcula al dividir la distancia (L) entre el tiempo que tomo en hacer el recorrido (t)
 $V = L/t$

El caudal se obtiene al multiplicar la velocidad del caudal (V) por el área transversal (A)

$$Q = V \cdot A.$$

Método área – velocidad con molinete. El molinete es un instrumento que permite medir la velocidad del agua a partir del número de revoluciones detectadas por el rodete (rueda de copas o propela). Cada molinete tiene una ecuación característica de la forma

$$V = mN + b,$$

donde m (pendiente) y b se determinan en un laboratorio de pruebas, mientras que N (revoluciones por segundo) se mide en campo.

Una vez determinada la velocidad, se multiplica por el área de la sección transversal para obtener el caudal.

Método de carga piezométrica con vertedores.

a) **vertedor rectangular sin contracciones.** El vertedor rectangular sin contracciones es una pantalla o pared de cresta biselada que se coloca verticalmente y en forma normal al canal o cauce. La altura del agua (carga) que fluye por encima del vertedor se relaciona con el caudal de la siguiente forma:

$$Q = 1.84L\sqrt{h^3}$$

Donde:

Q = caudal

[m³/s]

h = carga

[m]

La carga debe medirse aguas arriba a una distancia de, por lo menos, 4 veces la carga máxima del vertedor. Los vertedores rectangulares y triangulares son precisos con cargas mayores a 6 cm.

b) **Vertedor rectangular con contracciones laterales.** En estos vertedores la pantalla o pared tienen una escotadura de forma rectangular por donde fluye el agua, en este caso el caudal se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 1.84(L - 0.20h)\sqrt{h^3}$$

c) **Vertedor triangular.** En estos vertedores la escotadura es en forma de triángulo. Son más aptos que los medidores rectangulares para medir caudales pequeños, pero también requieren una carga mínima de 6 cm., para una medición confiable. La ecuación de los vertedores triangulares es la siguiente:

$$Q = 1.38 \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2}$$

Donde:

θ = ángulo de la escotadura (45, 60, 90 o 120°).

h = carga piezométrica

[m]

Método volumen tiempo. En este caso se utiliza un recipiente calibrado en el cual se capta el agua de la descarga y se mide el tiempo que toma en llenar el recipiente. El caudal se calcula al dividir el volumen entre el tiempo.

$$Q = V/t$$

Donde:

$$Q = \text{caudal} \quad [m^3/s].$$

$$V = \text{volumen} \quad [m^3].$$

$$t = \text{tiempo} \quad [s].$$

Para realizar la medición el recipiente se introduce rápidamente debajo de la corriente y se mide el tiempo desde que tarda en llenarse. El proceso se repite tres veces y se reporta el promedio de las mediciones. Este método sólo se aplica a descargas libres que caen en forma de chorro y cuando la velocidad del agua no es muy grande.

Escuadra. Este método se puede aplicar a descargas que se realizan en tubos horizontales. El método consiste en medir la distancia horizontal (L) y una altura fija (Y = 30.5 cm) que recorre el agua en su caída. Para ello se utiliza una escuadra cuyo lado menor mide 30.5 cm. Se coloca el lado mayor de la escuadra sobre el tubo y se desplaza hasta que la componente vertical toque el chorro de agua. El caudal

se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = 0.0039 L A$$

Donde:

$$L = \text{longitud horizontal del chorro} \quad [cm].$$

$$A = \text{área del tubo} \quad [cm^2].$$

El método aplica tanto para descargas con tubo lleno como con tubo semilleno. Cuando se trata de tubos semillenos es necesario hacer una corrección basada en el tirante (altura del agua dentro del tubo). Se calcula una relación X/D (altura o tirante entre el diámetro del tubo) y mediante una tabla se obtiene el porcentaje del área mojada de la tubería de descarga.

Cuando las descargas están sumergidas se puede medir a través de un molinete, un trazador o algún otro medidor de velocidad. Es importante que la velocidad del agua en el cuerpo receptor no interfiera con la medición del efluente. Para medir el caudal en descargas sumergidas es imprescindible conocer las dimensiones del tubo de la descarga y además dicha descarga no puede ser muy profunda.

En el caso de descargas subterráneas como la que provoca una fosa séptica se puede medir el cau-

dal con el método volumen tiempo o bien a través de un vertedor triangular, esto último siempre que la carga piezométrica pueda ser mayor a 6 centímetros.

Para preparar muestras compuestas es necesario aforar la descarga durante la toma de cada muestra puntual. Con base en los caudales obtenidos se calcula la aportación de cada muestra puntual a partir de la siguiente ecuación

$$VMS_i = VMC * (Q_i/Q_t)$$

Donde:

$$VMS_i = \text{volumen de cada una de las muestras simples o puntuales} \quad [L].$$

$$VMC = \text{volumen de la muestra compuesta} \quad [L].$$

$$Q_i = \text{caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra puntual} \quad [L/s].$$

$$Q_t = \sum Q_i = \text{sumatoria de los caudales individuales o puntuales} \quad [L/s].$$

AUTOEVALUACIÓN

1 Cualquier dispositivo utilizado para medir caudales de agua limpia puede usarse para aforar descargas de aguas residuales.

- a) Verdadero.
- b) Falso.

2 Cuales de los siguientes pasos se deben realizar para hacer la medición con flotador.

- a) Seleccionar un tramo recto de al menos 10 metros
- b) Marcar principio y fin del tramo con estacas o señales visibles
- c) Medir el tiempo que tarda el flotador en recorrer el tramo seleccionado.
- d) Todos los anteriores.
- e) Ninguno de los anteriores.

3 Todo molinete debe contar con una hoja de calibración y una ecuación de la forma:

- a) $V = mN + b.$
- b) $V = L/t.$
- c) $V = Ch^{3/2}.$

4 Los vertedores son ejemplos del método:

- a) Volumen—tiempo.
- b) Área— velocidad.
- c) Carga piezométrica.

5 Los vertedores requieren una carga mínima de:

- a) 6 cm.
- b) 10 cm.
- c) 2 cm.

6 Para calcular el caudal en los vertedores triangulares además de la carga hidráulica ¿qué otra variable hay que conocer?

- a) El ancho del canal.
- b) El ángulo de la escotadura.
- c) El espesor de la pared.

7 ¿Cuánto mide la componente vertical de la escuadra utilizada para aforar?

- a) 20.0 cm.
- b) 35.0 cm.
- c) 30.5 cm.

8 ¿Para aplicar el método de la escuadra en una tubería semillena es necesario medir?

- a) La velocidad del agua.
- b) El tirante del agua dentro del tubo.
- c) La altura del tubo con respecto al piso.

9 La ecuación para preparar muestras compuestas es:

- a) $VMS_i = VMC * (Q_i/Q_t).$
- b) $VMC = VMS_i * (Q_i/Q_t).$
- c) $VMS_i = VMC*(Q_i/Q_t).$

BIBLIOGRAFÍA

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.
- Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales-Muestreo, Diario Oficial de la Federación 25 de marzo de 1980.
- Norma Mexicana NMX-AA-014-1980 Cuerpos receptores-muestreo, Dirección General de Normas, 1980.
- Williams King, Ernest F. Brater, Manual de Hidráulica, Sección 9, Aforos de corrientes de agua, Ed. McGraw Hill, Inc., 8ª Edición, 1976.
- SEDUE, Programa Nacional de Capacitación Ambiental 1988, Manual de técnicas de muestreo para agua y aguas residuales, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México 1988.
- Juan C. Herrera Ponce y Efrén Peña Peña, Instructivo para aforo con molinete, (reimpresión), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2ª Edición, Jiutepec, Morelos, México, 1999.
- Efrén Peña Peña y Eduardo Moreno Bañuelos, Manual de aforos, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 3ª Edición, Jiutepec, Morelos, México, 1994.
- Leticia González S, Ricardo Romero R., Jorge Gallina A., Filis Moreno A. y Abdón Pacheco M., Manual de técnicas de muestreo de aguas y determinaciones en el campo, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 4ª Edición, México, D. F., 1982.

GLOSARIO

Agua residual: Es el líquido de composición variada proveniente de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación o alteración en su calidad original.

Aforo: Acción que consiste en medir el gasto o caudal que pasa a través de la sección transversal de una corriente de agua.

Área (A): Superficie comprendida dentro de un perímetro, medida en unidades de longitud al cuadrado.

Cresta: Pared horizontal de la escotadura que se encuentra en contacto con el líquido.

Cuerpo receptor: Toda red colectora, río, cuenca, cauce, vaso o depósito de aguas que son susceptibles de recibir directa o indirectamente la descarga de aguas residuales.

Descarga: Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.

Escala: Serie de divisiones que permiten indicar el valor de la magnitud que se mide.

Escandallo: Pieza regularmente de aleaciones de plomo con un peso que varía de 7 a 25 kg y cuyo fin es el de mantener en su posición al molinete y evitar en lo posible que sea desviado de la vertical por la corriente.

Escotadura: Abertura practicada en la pared que limita un líquido para medir su paso.

Escuadra: Pieza metálica o de otro material en forma de "L" que sirve para medir distancias con relación a dos líneas perpendiculares

Estación de aforo: Lugar en el cual se realizan sistemáticamente observaciones para conocer el régimen del gasto de una corriente.

Flotador: Objeto flotante que adquiere la velocidad superficial del agua.

Gasto o caudal (Q): Volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de una corriente en un periodo de tiempo, se expresa en unidades de longitud al cubo por tiempo

Molinete: Dispositivo que sirve para medir la velocidad del flujo en un punto cualquiera de una sección transversal.

Muestra compuesta: La que resulta de mezclar el número de muestras simples según lo indicado en la tabla 1 del anexo. Para

conformar la muestra compuesta el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

Muestra simple: La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo.

Sección transversal: Corte imaginario sobre un plano normal a la dirección del flujo del cauce del agua, resultando que la dirección del flujo es perpendicular a este plano de corte.

Sondeo: Medición de la profundidad de un cauce mediante una varilla o sonda, desde la superficie del agua hasta el lecho del cauce en uno o varios puntos.

Tirante (profundidad): Distancia de la superficie libre del agua al fondo del cauce.

Velocidad: Distancia que recorre una partícula de agua en la unidad de tiempo, expresada en longitud por tiempo.

Vertedor: Estructura colocada sobre la sección transversal de una corriente y cuya función es derivar, regular o medir el gasto que escurre a través de éste.

Volumen (V): Espacio ocupado por un cuerpo de agua, se mide en unidades de longitud al cubo. Cuando el volumen se relaciona con el espacio que ocupa un prisma de área (A) y su altura conocida como lámina (L), el volumen se obtiene con la ecuación: $V = A L$; cuando el volumen se relaciona con el gasto entregado en un intervalo de tiempo, el volumen se obtiene con la ecuación: $V = Q t$

ANEXO

1 Estación de control

Para medir el gasto, es muy conveniente valerse de una estación de control, la cual esté provista de una escala limnimétrica (figura A1), es decir, una regla vertical graduada en las unidades que más convengan a la medición, puede estar clavada en el cauce o adosada a una pared o bien pintada en madera, concreto o metal y cuando los canales estén revestidos, las escalas se pueden pintar sobre la pared del talud. Aguas arriba debe localizarse el dispositivo de medición, siempre y cuando se haya determinado previamente por medición directa la curva escala-gasto correspondiente, como se describe en el siguiente apartado de estos anexos, cuya gráfica, permite conocer para cada altura del nivel del agua leída en la escala, el gasto del cauce. Para que lo anterior tenga efecto, es requisito indispensable considerar que a cada lectura le corresponda un gasto único que además esté bien definido.

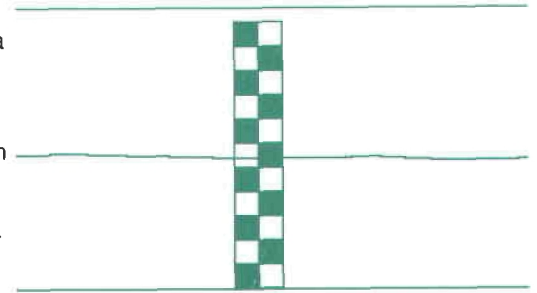


Figura A1 Limnómetro.

Una estación de control debe estar colocada verticalmente en el fondo del canal y ubicada en un lugar bien visible, de tal forma que se obtengan las lecturas fácilmente, por lo que es muy conveniente que dicho tramo sea rocoso o revestido y libre de depósitos de sedimento.

2 Obtención de la curva escala-gasto

Es posible obtener la relación escala-gasto de una sección transversal de una corriente cuando se tenga un canal con flujo uniforme o que no exista el efecto de remanso. Para obtener la relación, se debe seleccionar un tramo relativamente recto para realizar una serie de aforos mediante algún dispositivo de medición como el molinete. Para cada aforo, se debe medir la escala o tirante en el canal y una vez obtenidos los datos escala-gasto, se obtiene la siguiente ecuación empírica:

$$Q = \beta_0 h^{\beta_1}$$

Los parámetros β_0 y β_1 pueden obtenerse por el método de regresión, al considerar la siguiente transformación logarítmica de la ecuación anterior:

$$\ln[Q] = \ln[\beta_0] + \beta_1 \ln[h]$$

Ejemplo

Para ejemplificar el método de regresión, se hace acopio de los parámetros de escala y gasto que se muestran en la tabla A1 y que fueron obtenidos de un canal que se desea conocer su relación escala-gasto de la sección transversal de su corriente. Para Hacer el ajuste correspondiente de ésta relación se utilizó la calculadora científica CASIO fx-570s, pero puede utilizarse cualquier otra calculadora que tenga las misma características. El primer paso, es obtener el logaritmo natural de los valores de escala y gasto que se reportan en campo como sigue:

Tabla A1 Datos escala-gasto del canal.

Observación	Escala h(m)	Gasto Q m ³ /s	Escala Ln (h)	Gasto Ln (Q)
1	1.01	1.521	0.00995	0.41936
2	1.03	1.615	0.02955	0.47933
3	1.00	2.112	0.00000	0.74763
4	1.05	2.683	0.048769	0.98693
5	1.07	3.451	0.06765	1.23866
6	1.12	4.293	0.11332	1.45698
7	1.17	5.273	0.15700	1.66259
8	1.20	5.847	0.18232	1.76592
9	1.24	6.552	0.21511	1.87977
10	1.21	7.243	0.19062	1.98003
11	1.28	7.541	0.24686	2.02035
12	1.25	8.703	0.22314	2.16366
13	1.30	9.684	0.26236	2.27047

Observación	Escala h(m)	Gasto Q m ³ /s	Escala Ln (h)	Gasto Ln (Q)
14	1.32	10.582	0.27763	2.35915
15	1.37	11.437	0.31481	2.43685
16	1.33	12.624	0.28517	2.53559
17	1.39	13.421	0.32930	2.59682
18	1.41	14.337	0.34358	2.66284
19	1.37	14.228	0.31481	2.65521
20	1.43	15.110	0.35767	2.71535
21	1.41	16.632	0.34358	2.81132
22	1.44	17.393	0.36464	2.85606
23	1.44	18.265	0.36464	2.90498
24	1.45	18.686	0.37156	2.92777
25	1.43	19.352	0.35767	2.96279

Una vez que se tienen los logaritmos naturales de escala y gasto se procede a introducir los datos de la siguiente forma:

- Encender la calculadora por medio de la tecla "AC" (ON)
- Presionar la tecla "MODE" con el fin de escoger el modo para realizar cálculos de regresión lineal, inmediatamente aparece en la pantalla los número del 1 al 4, siendo el correspondiente a la regresión lineal el 3.
- Al presionar la tecla numérica 3 , aparece en la parte superior de la pantalla el término "LR" el cual indica que esta seleccionado el modo de regresión lineal.
- Presionar la tecla "SHIFT" e inmediatamente la tecla "Scl" con objeto de borrar por completo los datos estadísticos que estén localizados en la memoria de la calculadora y así poder introducir nuevos datos.
- Se introduce el primer dato de escala que es el 0.00995 y se presiona la tecla " x_D, y_D ", inmediatamente se introduce el dato de gasto correspondiente que en éste caso es 0.41936 y se presiona la tecla "DATA", así sucesivamente se ingresan el resto de datos hasta que finalmente se introducen los últimos valores, es decir, se marca 0.35767, se presiona la tecla " x_D, y_D ", se introduce el último dato 2.96279 y se presiona la tecla "DATA". La calculadora estará en condiciones de encontrar la constante y el coeficiente de regresión que debe utilizarse en la expresión empírica, para esto se presiona la tecla "SHIFT" seguida de la tecla "A" Y aparece en la pantalla el número 0.408633, quedando la siguiente expresión:

$$\text{Ln}[\beta_0] = 0.61891$$

Para obtener el valor de β_0 se calcula el antilogaritmo de 0.61891, por lo tanto $\beta_0 = 1.85690$, para determinar el coeficiente de regresión se presiona la tecla "SHIFT", se presiona la tecla "B" y en la pantalla aparecerá el valor correspondiente de $\beta_1 = 6.24134$. Los datos de β_0 y β_1 que se obtuvieron mediante la regresión, se substituyen en la ecuación empírica de gasto, la cual es valida únicamente para la corriente y la sección de aforos considerada en la que el gasto (Q) está en función del tirante (h), por lo tanto la ecuación empírica quedará de la siguiente forma:

$$Q = \beta_0 h^{\beta_1} = 1.85690 h^{6.24134} \quad \text{Donde: } Q = \text{Gasto, m}^3/\text{s} \quad h = \text{Carga hidráulica o tirante, m}$$

- Al graficar la ecuación se obtendrá la curva ajustada como se muestra en la lámina 23, una vez conocida la curva, con determinar el tirante se estará en posibilidad de conocer en cualquier momento el gasto correspondiente.

$$Q = 1.85690 h^{6.24134}$$

Substituyendo los valores de h en la ecuación anterior, se tendrán los gastos correspondientes como se muestra en la tabla A2 y la gráfica (figura A2) siguientes.

Tabla A2 Caudal ajustado.

Carga (m)	Gasto (m^3/s)
1.0	1.856
1.1	3.366
1.2	5.794
1.3	9.548
1.4	15.164
1.45	18.877

Es importante hacer notar que la curva sólo es válida para la sección y en el rango de aforos considerado, es decir, en el caso anterior los gastos que se determinen a través de esta curva son confiables desde $1.521 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $19.352 \text{ m}^3/\text{s}$, fuera de estos rangos el gasto se considera erróneo.

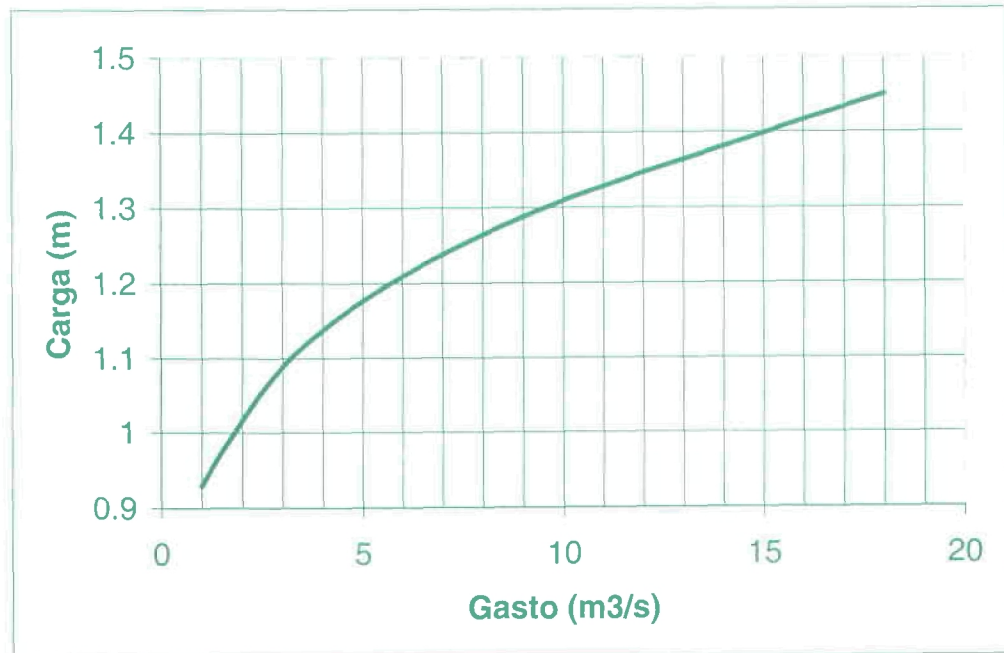


Figura A2 Curva de gasto

Ejemplo: Obtener el gasto de un cauce para un tirante de 1.30 m en la sección de aforo, utilizando la curva de la lámina 23 y considerando la ecuación empírica que se obtuvo en el resultado de la regresión anterior. Utilizando la gráfica de esta página, se ingresa en el eje de las ordenadas con una carga de 1.30 y se ve su intersección con la curva, una vez realizado esto, se traza una vertical hasta el eje de las abscisas que contiene los valores de gasto y se toma la lectura correspondiente, la cual corresponde a $9.54 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando la ecuación empírica mencionada se substituye el tirante y el resultado debe ser aproximadamente igual:

$$Q = 1.85690h^{6.24134} = 1.85690(1.30)^{6.24134} = 9.5487 \text{ m}^3/\text{s}$$

3 Determinación de la sección transversal

Si la sección transversal de un canal se aproxima a una parábola (figura A3).

Entonces puede calcularse de la siguiente forma:

$$A_T = \frac{2}{3} ay$$

Donde:

A_T = área de sección transversal, [m²]

a = ancho del espejo del agua, [m]

y = profundidad máxima, [m]

Si la sección transversal es muy irregular se debe dividir al menos en dos franjas con el fin de obtener su área.

La distribución de velocidades en un cauce no es uniforme, por lo que es necesario dividir la sección transversal en franjas con el fin de medir en cada una de ellas tanto el área como la velocidad media del agua residual, de ahí que el gasto por franja se obtenga multiplicando el área y la velocidad y por lo tanto, el gasto total será el resultado de la suma de todos los gastos de cada una de las franjas en que fue dividida la sección transversal. Si el área de la sección transversal es regular corresponde a un canal revestido y si es irregular será un canal de tierra o un cauce natural.

Para determinar el área de la sección transversal se procede de la siguiente forma:

- Seleccionar un tramo lo mas recto que sea posible y libre de maleza.
- Medir el ancho de la corriente: en el caso de las secciones libres de maleza la medición se debe realizar de orilla a orilla, ya que la maleza frena el movimiento del agua. Si existe maleza, la medición se debe llevar a cabo solo en la zona en donde el agua fluye.
- Dividir el ancho de la corriente en franjas de acuerdo con la tabla A3, para esto se deben hacer las marcas de franja sobre un puente de aforo o si no es posible a través de un cable canastilla. Se sugiere que el ancho de la franja sea múltiplo de 0.1 m con el fin de facilitar los cálculos.

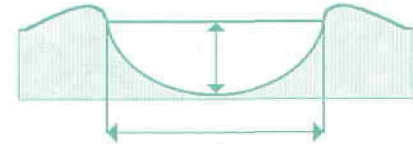


Figura A3 Sección parabólica.

Tabla A3 Ancho de franja en función del ancho de la corriente.

Ancho de la corriente (m)	Ancho de la franja (m)
Hasta 2.0	0.50 - 10
2.0 - 4.0	1.0 - 2.0
4.0 - 10.0	2.0 - 4.0
10.0 - 50.0	4.0 - 6.0
50.0 - 100.0	6.0 - 10.0

Nota:

El ancho de cada franja depende del ancho del cauce y de la oscilación de la velocidad en la sección transversal. Con el fin de obtener una mayor precisión, el ancho de cada franja debe ser menor mientras la variación de la velocidad sea mayor. En los canales revestidos se debe considerar también el talud para definir el ancho de las franjas. Dividir el ancho de franja en dos partes iguales, marcando el punto medio en el puente de aforo o cable canastilla.

- Medir los tirantes correspondientes (profundidades) ya sea con una varilla o una sonda flexible con escandallo, ésta última sufre desviaciones con respecto a su vertical debido al empuje de la corriente, por lo que es necesario corregir dicha desviación como más adelante se describe.
- Calcular el tirante promedio (d) conforme a la siguiente ecuación:

$$d = \frac{A + 2B + C}{4}$$

Donde:

d = tirante promedio
A = tirante inicial (extremo)
B = tirante central
C = tirante final (extremo)

Calcular el área de cada franja (A) conforme a la siguiente ecuación:

$$A = a \cdot d$$

Donde:

A = área de cada franja

a = ancho de la franja

d = tirante promedio

Calcular el área de la sección transversal (A_T) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$$

Ejemplo

Se requiere determinar el gasto de un cauce con fondo irregular y que contiene hierba. La medición se llevó a cabo con un flotador, al momento de hacer la medición se presentó viento que frenó el flotador; se seleccionó un tramo de medición de 10 m y se registró un tiempo promedio del recorrido del flotador de 42 segundos para las cuatro lecturas que se realizaron. No se consideraron del cauce 14 cm de la orilla derecha y 16 cm de la orilla izquierda y 10 cm del fondo, esto con el fin de que únicamente se considerara el área en donde el agua se mueve libremente. El ancho del espejo del agua es de 2.15 m y los tirantes de las dos franjas de la sección transversal son las que se muestran en la figura A4.

Para el cálculo del tirante promedio por franja (d), se utiliza la ecuación:

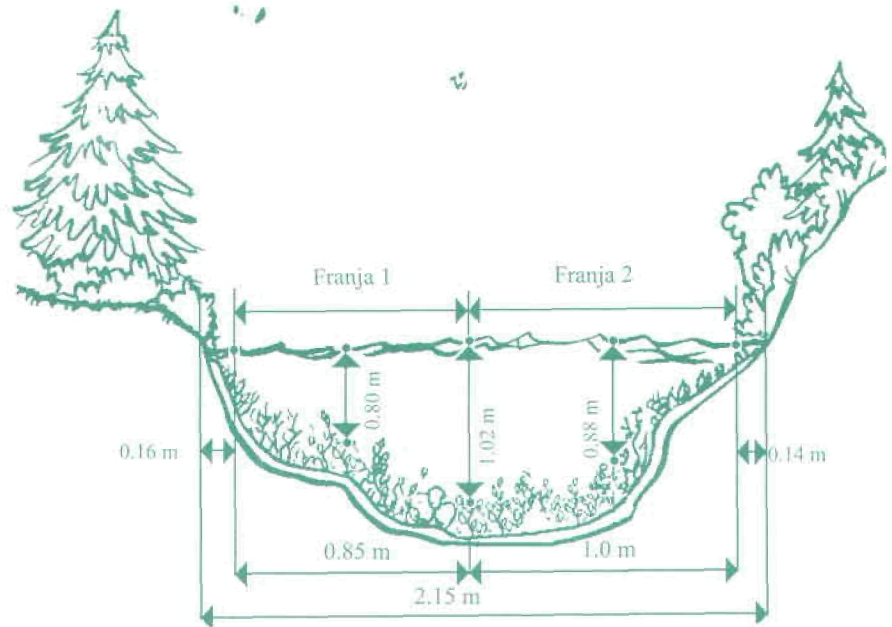


Figura A4 Sección irregular con hierbas en el lecho del canal.

$$d = \frac{A+2B+C}{4}$$

$$d_{\text{franja 1}} = \frac{0+2(0.80)+1.02}{4} = \frac{2.62}{4} = 0.655m$$

$$d_{\text{franja 2}} = \frac{1.02+2(0.88)+0}{4} = \frac{2.78}{4} = 0.695m$$

Área de cada franja

$$A = a d$$

$$A_{\text{franja 1}} = 0.85 m \times 0.655 = 0.556 m^2$$

$$A_{\text{franja 2}} = 1.00 m \times 0.655 = 0.695 m^2$$

Área de la sección transversal

$$A_T = A_{\text{franja 1}} + A_{\text{franja 2}}$$

$$A_T = 0.556 m^2 + 0.695 m^2 = 1.251 m^2$$

Una vez obtenida el área transversal, se multiplica por la velocidad media del agua y se obtiene el caudal.

4 Distribución local de las velocidades de la sección transversal

La velocidad que se produce en una sección transversal de un cauce, varía a lo ancho y sobre cada vertical, por lo que, no es conveniente medirla en un solo punto. La velocidad entonces, se distribuye aproximadamente como se muestra en la figura A5, observándose que en la sección transversal de una corriente existen isotacas, es decir,

curvas que unen los puntos que tienen la misma velocidad, en la cual se presenta una velocidad mínima en el fondo del cauce, conforme se acerca a la superficie del agua hasta obtener una velocidad máxima, a partir del cual disminuye hasta la superficie.

La velocidad máxima se presenta de 5 a 25% del tirante total (0.05 a 0.25 d) en la vertical y la velocidad promedio al 60% del tirante total en la vertical (0.6 d), dato que se utiliza posteriormente para los cálculos.

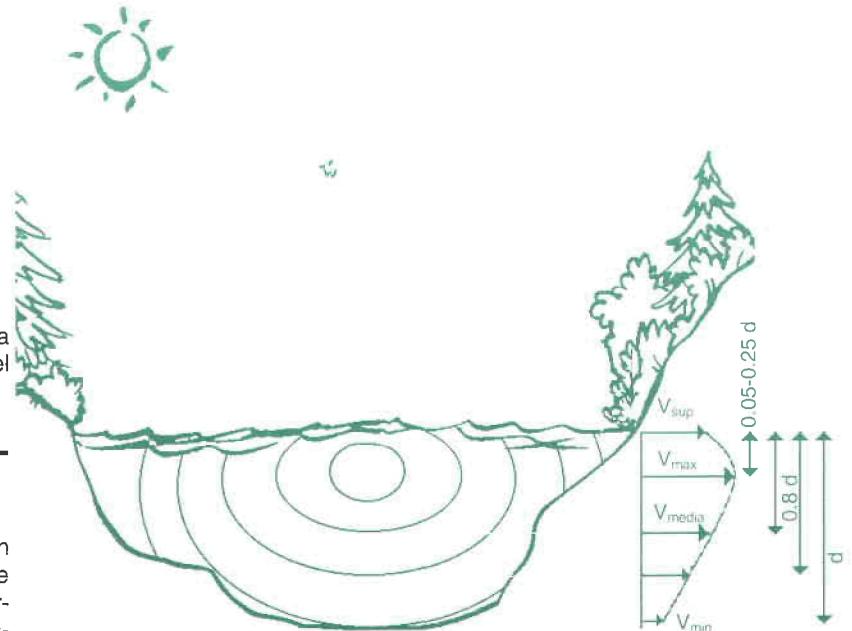


Figura A5 Distribución de velocidades en un canal.

Una vez que la sección transversal ha sido dividida en franjas, se estará en posibilidad de medir la velocidad media en la vertical central de cada una de las franjas, por lo que hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

En todos los caso deben hacerse por lo menos tres mediciones de la velocidad en el mismo punto y en seguida promediarlas.

Se puede obtener una muy buena estimación de la velocidad media si se promedian las velocidades a 0.2 y 0.8 de profundidad (figura A6). El método es recomendable cuando la velocidad varía mucho en la vertical, o si existen tirantes mayores a 1.0 m.

Cuando existe poca variación de la velocidad en la vertical o existen tirantes menores de 1.0 m, se recomienda medir la velocidad a 0.6 de profundidad.

Para secciones transversales menores a 0.6 m^2 en donde la velocidad casi no varía, se sugiere multiplicar la velocidad superficial por un coeficiente adimensional que varía de 0.85 a 0.95 y dependerá de las condiciones del viento $K = 0.9$ cuando no se presenta viento; $K = 0.95$ cuando se presenta viento frenando la velocidad del caudal; y $K = 0.85$ cuando existe viento pero no frena la velocidad del caudal.

En cauces de gran profundidad se recomienda promediar las velocidades obtenidas de 0.2, 0.6 y 0.8 de profundidad.

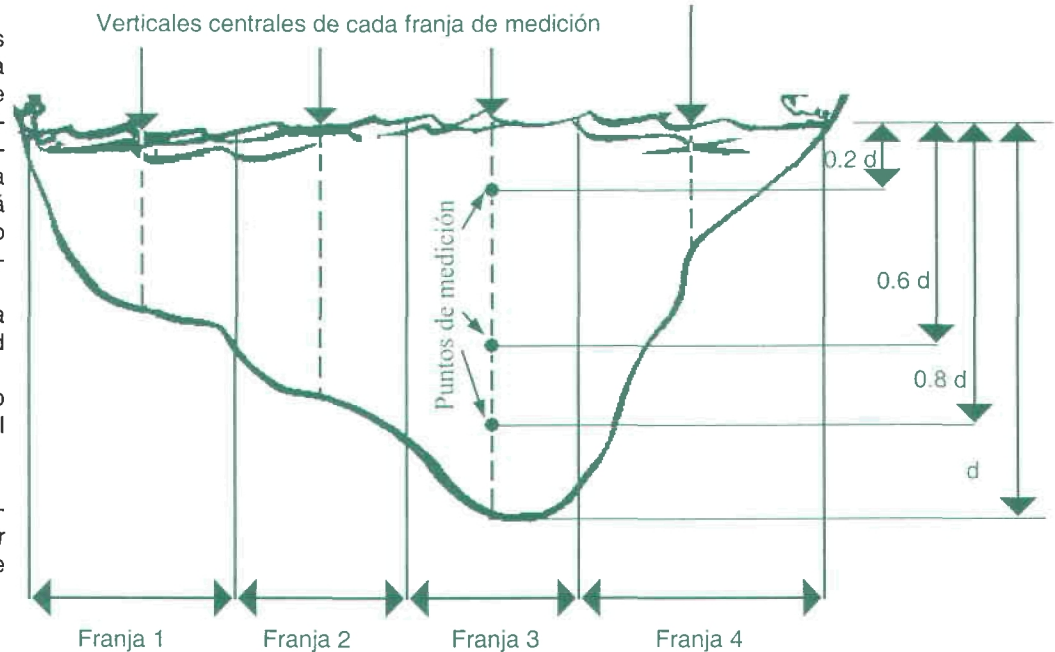


Figura A6 Profundidades recomendadas para la medición de la velocidad del agua.

5 Corrección por desviación de la vertical por uso de la sonda flexible

Cuando por las condiciones del cauce, se requieren utilizar el molinete y un escandallo, y si debido al empuje de la corriente se produce una desviación de la sonda flexible que los sostiene (figura A7), se debe hacer la corrección para obtener la profundidad de la vertical de la corriente de acuerdo con la siguiente metodología:

- Medir la distancia vertical AB.
- Sumergir la sonda flexible hasta que el escandallo toque el fondo del cauce y medir la longitud de la sonda flexible AF.
- Calcular la longitud superficial del cable AE de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$AE = AB \sec \varphi$$
- Determinar la longitud de la sonda flexible que detiene al molinete y al escandallo EF de la siguiente forma: $EF = AF - AE$
- Calcular la profundidad real de la vertical de la corriente (BC) mediante la siguiente ecuación: $BC = (1 + k) EF$

Tabla A4 Factor k para la corrección de la desviación de la vertical.

φ	k	Sec φ	φ	k	Sec φ
10	0.0050	1.0154	24	0.0296	1.0946
12	0.0072	1.0223	26	0.0350	1.1126
14	0.0098	1.0306	28	0.0408	1.1326
16	0.0128	1.0403	30	0.0472	1.1547
18	0.0164	1.0515	32	0.0544	1.1792
20	0.0204	1.0642	34	0.0620	1.2062
22	0.0248	1.0785	36	0.0698	1.2361

Donde la k es un factor para corregir la desviación de la vertical conforme a la tabla A4.

Para ejemplificar lo anterior, se realizó una medición mediante el molinete y dada la profundidad, se le adicionó un escandallo, sin embargo debido a la fuerte corriente del cauce, hubo una desviación respecto a la vertical, por lo que es necesario hacer la corrección correspondiente, los datos que se obtuvieron son los que a continuación se indican:

AF = longitud total de la sonda = 11.5 m
 AB = longitud vertical sin sumergir = 2.30 m
 φ = ángulo con respecto a la vertical = 26°

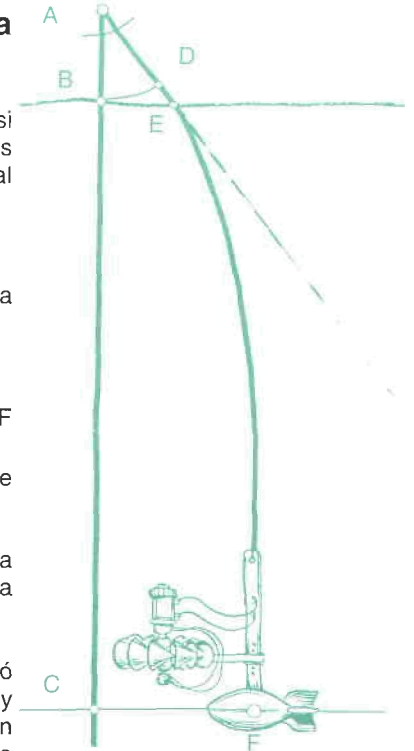


Figura A7 Corrección por desviación de la vertical.

BC = profundidad real la que se desea obtener

La figura A7 muestra las secciones a las cuales se refieren los datos anteriores y de acuerdo con la tabla A4, el ángulo $\varphi = 26^\circ$ le corresponde una $k = 0.0350$, por lo que el resultado es el siguiente:

$$AE = AB \sec \varphi = 2.30 \times \sec (26^\circ) = 2.5 \text{ m} \times 1.1126 = 2.8 \text{ m}$$

$$EF = AF - AE = 11.5 \text{ m} - 2.8 \text{ m} = 8.7 \text{ m}$$

Por lo tanto, la profundidad real sobre la vertical, será la siguiente:

$$BC = (1 - k) EF = (1 - 0.0350) \times 8.7 \text{ m} = 8.40 \text{ m}$$

6 Gasto total del cauce

El objetivo de medir en franjas la sección transversal es medir con mayor precisión el área y la velocidad del cauce y por supuesto el gasto determinado dependerá de estas mediciones, por lo que el gasto por franja (q_i) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$q_i = A_i * V_i$$

Donde: q_i = gasto por franja; A_i = área de la franja; V_i = velocidad de cada franja

Por lo tanto el gasto total Q_T será la suma de todos los gasto parciales de cada franja:

$$Q_T = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

7 Escala de gancho

En principio, la lectura de un tirante en un canal puede realizarse con una escala pintada en la pared del mismo, corroborando el nivel de agua que la moja, esto podría funcionar siempre y cuando las corrientes no sean turbulentas ya que es difícil apreciar correctamente dicho nivel. En este sentido es preferible usar algún dispositivo que reúna mejores características para una medición adecuada como es el caso de la *escala de gancho* que consiste en una barra graduada en centímetros y milímetros, que termina en un gancho aguzado (figura A8), esta se sostiene por medio de un soporte colocándola en forma vertical en el interior del bote.

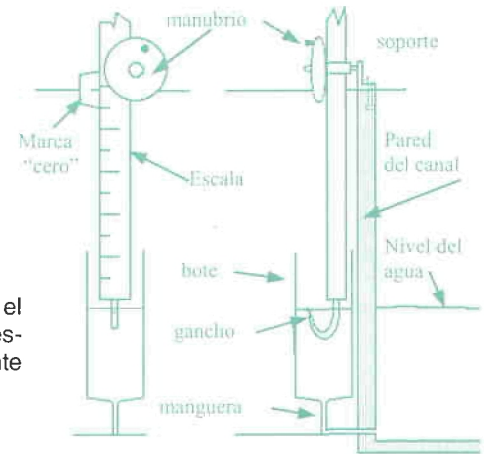


Figura A8 Escala de gancho.

La escala puede subir y bajar a través de un rodillo que se hace girar por medio de un manubrio, el cual permite que el gancho quede sumergido hasta que la punta del mismo toca la superficie libre. Una vez que se realiza lo anterior, se lee la graduación de la escala en correspondencia a una marca “cero” localizada en una placa fija, la cual se referencia al fondo del canal o a una marca en el dispositivo medidor, mismas que han sido establecidas previamente, por ejemplo si se conoce que la marca corresponde a 1.402 m y la lectura de la escala es de 0.463, el tirante d en el canal es de:

$$D = 1.402 - 0.463 = 0.939 \text{ m}$$

Para la utilización de este dispositivo es necesario realizar una perforación al canal y conectar a ésta una manguera que vaya directamente a un bote, y por vasos comunicantes, se establezca el mismo nivel del canal. La razón de hacerlo en esta forma es que aunque en el canal el flujo sea turbulento, en el bote el nivel sea tranquilo a fin de poder realizar la lectura del nivel con gran facilidad.

8 Tablas para vertedores

A partir de las ecuaciones para cálculo de caudales en vertedores rectangulares y triangulares se desarrollaron las siguientes tablas. Los números marcados en verde indican que el flujo está fuera del intervalo de confiabilidad del vertedor.

Vertedor rectangular sin contracciones

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.01	0.18	0.37	0.55	0.74	0.92
0.02	0.52	1.04	1.56	2.08	2.60
0.03	0.96	1.91	2.87	3.82	4.78
0.04	1.47	2.94	4.42	5.89	7.36
0.05	2.06	4.11	6.17	8.23	10.29
0.06	2.70	5.41	8.11	10.82	13.52
0.07	3.41	6.82	10.22	13.63	17.04
0.08	4.16	8.33	12.49	16.65	20.82
0.09	4.97	9.94	14.90	19.87	24.84
0.10	5.82	11.64	17.46	23.27	29.09
0.11	6.71	13.43	20.14	26.85	33.56
0.12	7.65	15.30	22.95	30.59	38.24

h = carga hidráulica

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.13	8.62	17.25	25.87	34.50	43.12
0.14	9.64	19.28	28.92	38.55	48.19
0.15	10.69	21.38	32.07	42.76	53.45
0.16	11.78	23.55	35.33	47.10	58.88
0.17	12.90	25.79	38.69	51.59	64.49
0.18	14.05	28.10	42.15	56.21	70.26
0.19	15.24	30.48	45.72	60.95	76.19
0.20	16.46	32.91	49.37	65.83	82.29
0.21	17.71	35.41	53.12	70.83	88.54
0.22	18.99	37.97	56.96	75.95	94.93
0.23	20.30	40.59	60.89	81.18	101.48
0.24	21.63	43.27	64.90	86.54	108.17

Vertedor rectangular sin contracciones

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	1.10	1.29	1.47	1.66	1.84
0.02	3.12	3.64	4.16	4.68	5.20
0.03	5.74	6.69	7.65	8.60	9.56
0.04	8.83	10.30	11.78	13.25	14.72
0.05	12.34	14.40	16.46	18.51	20.57
0.06	16.23	18.93	21.63	24.34	27.04
0.07	20.45	23.85	27.26	30.67	34.08
0.08	24.98	29.14	33.31	37.47	41.63
0.09	29.81	34.78	39.74	44.71	49.68
0.10	34.91	40.73	46.55	52.37	58.19
0.11	40.28	46.99	53.70	60.42	67.13
0.12	45.89	53.54	61.19	68.84	76.49
0.13	51.75	60.37	69.00	77.62	86.24
0.14	57.83	67.47	77.11	86.75	96.39
0.15	64.14	74.83	85.52	96.20	106.89
0.16	70.66	82.43	94.21	105.98	117.76
0.17	77.38	90.28	103.18	116.07	128.97
0.18	84.31	98.36	112.41	126.46	140.52
0.19	91.43	106.67	121.91	137.15	152.39
0.20	98.74	115.20	131.66	148.12	164.57
0.21	106.24	123.95	141.66	159.36	177.07
0.22	113.92	132.91	151.89	170.88	189.87
0.23	121.78	142.07	162.37	182.66	202.96
0.24	129.80	151.44	173.07	194.71	216.34

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.25	138.00	161.00	184.00	207.00	230.00
0.26	146.36	170.76	195.15	219.54	243.94
0.27	154.89	180.70	206.52	232.33	258.14
0.28	163.57	190.83	218.09	245.36	272.62
0.29	172.41	201.15	229.88	258.62	287.35
0.30	181.41	211.64	241.87	272.11	302.34
0.31	190.55	222.31	254.07	285.83	317.59
0.32	199.85	233.15	266.46	299.77	333.08
0.33	209.29	244.17	279.05	313.93	348.81
0.34	218.87	255.35	291.83	328.31	364.78
0.35	228.60	266.70	304.80	342.90	381.00
0.36	238.46	278.21	317.95	357.70	397.44
0.37	248.47	289.88	331.29	372.70	414.11
0.38	258.61	301.71	344.81	387.91	431.02
0.39	268.88	313.70	358.51	403.33	448.14
0.40	279.29	325.84	372.39	418.94	465.49
0.41	289.83	338.14	386.44	434.75	483.05
0.42	300.50	350.58	400.67	450.75	500.83
0.43	311.29	363.18	415.06	466.94	518.82
0.44	322.22	375.92	429.62	483.33	537.03
0.45	333.26	388.81	444.35	499.90	555.44

h = carga hidráulica

Vertedor rectangular con contracciones

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.01	0.18	0.36	0.55	0.73	0.92
0.02	0.50	1.02	1.54	2.06	2.58
0.03	0.90	1.85	2.81	3.77	4.72
0.04	1.35	2.83	4.30	5.77	7.24
0.05	1.85	3.91	5.97	8.02	10.08
0.06	2.38	5.08	7.79	10.49	13.20
0.07	2.93	6.34	9.75	13.15	16.56
0.08	3.50	7.66	11.82	15.99	20.15
0.09	4.07	9.04	14.01	18.98	23.95
0.10	4.65	10.47	16.29	22.11	27.93
0.11	5.24	11.95	18.66	25.37	32.09
0.12	5.81	13.46	21.11	28.76	36.41
0.13	6.38	15.01	23.63	32.26	40.88
0.14	6.94	16.58	26.22	35.86	45.49
0.15	7.48	18.17	28.86	39.55	50.24
0.16	8.01	19.78	31.56	43.34	55.11
0.17	8.51	21.41	34.31	47.20	60.10
0.18	8.99	23.04	37.10	51.15	65.20
0.19	9.45	24.69	39.93	55.16	70.40
0.20	9.87	26.33	42.79	59.25	75.70
0.21	10.27	27.98	45.68	63.39	81.10
0.22	10.63	29.62	48.61	67.59	86.58
0.23	10.96	31.26	51.55	71.85	92.14
0.24	11.25	32.88	54.52	76.15	97.79

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.25	11.50	34.50	57.50	80.50	103.50
0.26	11.71	36.10	60.50	84.89	109.28
0.27	11.87	37.69	63.50	89.32	115.13
0.28	12.00	39.26	66.52	93.78	121.04
0.29	12.07	40.80	69.54	98.27	127.01
0.30	12.09	42.33	72.56	102.80	133.03
0.31	12.07	43.83	75.59	107.34	139.10
0.32	11.99	45.30	78.61	111.91	145.22
0.33	11.86	46.74	81.62	116.50	151.38
0.34	11.67	48.15	84.63	121.11	157.59
0.35	11.43	49.53	87.63	125.73	163.83
0.36	11.13	50.87	90.62	130.36	170.10
0.37	10.77	52.18	93.59	135.00	176.41
0.38	10.34	53.45	96.55	139.65	182.75
0.39	9.86	54.67	99.49	144.30	189.12
0.40	9.31	55.86	102.41	148.96	195.50
0.41	8.69	57.00	105.31	153.61	201.92
0.42	8.01	58.10	108.18	158.26	208.35
0.43	7.26	59.15	111.03	162.91	214.79
0.44	6.44	60.15	113.85	167.55	221.26
0.45	5.55	61.10	116.64	172.19	227.73

h = carga hidráulica

Vertedor rectangular con contracciones

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	1.10	1.28	1.47	1.65	1.84
0.02	3.10	3.62	4.14	4.66	5.18
0.03	5.68	6.64	7.59	8.55	9.50
0.04	8.71	10.19	11.66	13.13	14.60
0.05	12.14	14.19	16.25	18.31	20.37
0.06	15.90	18.61	21.31	24.01	26.72
0.07	19.97	23.38	26.78	30.19	33.60
0.08	24.31	28.48	32.64	36.80	40.97
0.09	28.91	33.88	38.85	43.82	48.79
0.10	33.75	39.57	45.39	51.20	57.02
0.11	38.80	45.51	52.23	58.94	65.65
0.12	44.06	51.71	59.35	67.00	74.65
0.13	49.50	58.13	66.75	75.38	84.00
0.14	55.13	64.77	74.41	84.05	93.69
0.15	60.93	71.62	82.31	93.00	103.69
0.16	66.89	78.66	90.44	102.22	113.99
0.17	73.00	85.89	98.79	111.69	124.59
0.18	79.25	93.30	107.35	121.41	135.46
0.19	85.64	100.88	116.12	131.36	146.60
0.20	92.16	108.62	125.08	141.53	157.99
0.21	98.81	116.51	134.22	151.93	169.63
0.22	105.57	124.55	143.54	162.53	181.51
0.23	112.44	132.74	153.03	173.33	193.62
0.24	119.42	141.05	162.69	184.32	205.95

h (m)	Longitud del vertedor (m)				
	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.25	126.50	149.50	172.50	195.50	218.50
0.26	133.68	158.07	182.46	206.86	231.25
0.27	140.95	166.76	192.58	218.39	244.21
0.28	148.30	175.57	202.83	230.09	257.35
0.29	155.74	184.48	213.22	241.95	270.69
0.30	163.27	193.50	223.73	253.97	284.20
0.31	170.86	202.62	234.38	266.14	297.89
0.32	178.53	211.84	245.14	278.45	311.76
0.33	186.26	221.15	256.03	290.91	325.79
0.34	194.07	230.54	267.02	303.50	339.98
0.35	201.93	240.03	278.13	316.23	354.33
0.36	209.85	249.59	289.34	329.08	368.82
0.37	217.82	259.24	300.65	342.06	383.47
0.38	225.85	268.95	312.06	355.16	398.26
0.39	233.93	278.74	323.56	368.37	413.19
0.40	242.05	288.60	335.15	381.70	428.25
0.41	250.22	298.53	346.83	395.14	443.44
0.42	258.43	308.51	358.60	408.68	458.76
0.43	266.68	318.56	370.44	422.32	474.21
0.44	274.96	328.66	382.36	436.07	489.77
0.45	283.27	338.82	394.36	449.91	505.45

h = carga hidráulica

Vertedor triangular

h (m)	Angulo θ		
	45	60	90
0.01	0.01	0.01	0.01
0.02	0.03	0.05	0.08
0.03	0.09	0.12	0.22
0.04	0.18	0.25	0.44
0.05	0.32	0.45	0.77
0.06	0.50	0.70	1.22
0.07	0.74	1.03	1.79
0.08	1.03	1.44	2.50
0.09	1.39	1.94	3.35
0.10	1.81	2.52	4.36
0.11	2.29	3.20	5.54
0.12	2.85	3.97	6.88
0.13	3.48	4.85	8.41
0.14	4.19	5.84	10.12
0.15	4.98	6.94	12.03
0.16	5.85	8.16	14.13
0.17	6.81	9.49	16.44
0.18	7.86	10.95	18.97
0.19	8.99	12.54	21.72
0.20	10.23	14.25	24.69
0.21	11.55	16.10	27.89
0.22	12.98	18.09	31.33
0.23	14.50	20.21	35.01
0.24	16.13	22.48	38.94
0.25	17.86	24.90	43.13
0.26	19.70	27.46	47.57
0.27	21.65	30.18	52.27
0.28	23.71	33.05	57.25
0.29	25.89	36.08	62.50
0.30	29.32	40.87	70.78

h (m)	Angulo θ		
	45	60	90
0.31	31.78	44.30	76.73
0.32	34.37	47.90	82.97
0.33	37.07	51.68	89.50
0.34	39.90	55.62	96.34
0.35	42.86	59.74	103.48
0.36	45.95	64.04	110.92
0.37	49.16	68.52	118.68
0.38	52.50	73.18	126.76
0.39	55.98	78.03	135.15
0.40	59.59	83.07	143.87
0.41	63.34	88.29	152.92
0.42	67.23	93.71	162.31
0.43	71.26	99.32	172.03
0.44	75.43	105.13	182.09
0.45	79.74	111.14	192.50
0.46	84.19	117.35	203.26
0.47	88.79	123.76	214.37
0.48	93.54	130.38	225.83
0.49	98.44	137.21	237.66
0.50	103.49	144.25	249.85
0.51	108.69	151.50	262.41
0.52	114.05	158.97	275.34
0.53	119.56	166.65	288.64
0.54	125.23	174.55	302.32
0.55	131.05	182.67	316.39
0.56	137.04	191.01	330.84
0.57	143.18	199.58	345.68
0.58	149.49	208.37	360.91
0.59	155.97	217.39	376.54
0.60	162.60	226.65	392.56

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCION

El lector se obliga a devolver este libro antes del
vencimiento del préstamo señalado por el último sello

--	--	--

IMTA / CCA / F / PD.

FORMA IMTA - D - 036

Apartado Postal 202 CIVAC, Mor. 62500
Jiutepec, Mor.

SERIE AUTODIDÁCTICA DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN DEL AGUA (CNA)
COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA HIDRÁULICA (IMTA)

SERIE VERDE

ISBN	TÍTULO	AUTORES
968-7417-82-X	FUNDAMENTOS TÉCNICOS PARA EL MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES	ANA LUISA ARCE VELÁZQUEZ CÉSAR G. CALDERÓN MÓLGORA ANA CECILIA TOMASINI ORTÍZ
968-7417-85-4	MUESTREO Y PRESERVACIÓN PARA COLIFORMES FECALES Y HUEVOS DE HELMINTO	ANA CECILIA TOMASINI ORTÍZ
968-7417-83-8	MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE GRASAS Y ACEITES, Y DETERMINACIÓN DE CAMPO DE pH, TEMPERATURA Y MATERIA FLOTANTE	ANA LUISA ARCE VELÁZQUEZ
968-7417-86-2	IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS PRIMARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	CÉSAR G. CALDERÓN MÓLGORA
968-7417-88-9	AFOROS DE DESCARGAS	ALFREDO A. GONZÁLEZ CAMACHO
968-7417-87-0	IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS SECUNDARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	CÉSAR G. CALDERÓN MÓLGORA
968-7417-84-6	MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	RAFAEL F. GÓMEZ MENDOZA MANUEL SÁNCHEZ ZARZA
968-7417-89-7	RIESGO Y SEGURIDAD EN EL MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUAS RESIDUALES	ANA LUISA ARCE VELÁZQUEZ ROGELIO LÓPEZ LÓPEZ