



**MINISTERIO DE AGRICULTURA**



# Programa de Entrenamiento en Servicio-PES

**INSTRUCTIVO TECNICO**



**Calibración de Estructuras  
Hidráulicas de Medición**

**2 0 0 4**



**MINISTERIO DE AGRICULTURA**



Jr. Teniente Emilio Fernández 130 Santa Beatriz - Lima 1

Central Telefónica: 424-4488 Fax: 433-2055

[proyecto@psi.gob.pe](mailto:proyecto@psi.gob.pe)

[www:psi.gob.pe](http://www.psi.gob.pe)





“Desarrollando la Cultura del Uso Eficiente del Agua”

# Presentación

*El Proyecto Subsectorial de Irrigación (PSI) del Ministerio de Agricultura, a través del Programa de Entrenamiento en Servicio (PES), tiene como objetivo general, mejorar la gestión de las Organizaciones de Usuarios para lograr una administración eficaz y eficiente del recurso hídrico, en los sistemas de riego y drenaje bajo su responsabilidad, en beneficio de los usuarios del agua de riego.*

*Así mismo, uno de los objetivos específicos del programa, es implementar en la organización, adecuados métodos y procedimientos técnico - administrativos para ordenar y mejorar la distribución del agua de riego, mediante los planes de cultivo y riego (PCR), los planes de distribución de agua (PDA), el mejoramiento del sistema hidrométrico y el establecimiento de planes de mantenimiento de la red de riego y drenaje, con la finalidad de que todos los usuarios reciban suficientes dotaciones de agua, tanto en cantidad, calidad y oportunidad, de acuerdo a las áreas sembradas y las demandas de los cultivos implantados.*

*Con este propósito el PSI a través del PES ha elaborado instructivos técnicos de uso sencillo y práctico, que permitirá al personal responsable de las actividades de riego de la organización, realizar la correcta determinación, medición y el control de las dotaciones de agua de riego a nivel de canales de conducción, distribución y predio. Estos instructivos son los siguientes: Determinación de Eficiencias de Conducción y Distribución; Calibración de Estructuras Hidráulicas de Medición, términos de referencia para la elaboración de expedientes técnicos de mejoramiento, mantenimiento y conservación de obras hidráulicas.*

*Ing. Manuel Manrique Ugarte  
Director Ejecutivo del PSI*

# ÍNDICE

	Pág.
<b>1.0 INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1 GENERALIDADES .....	8
1.2 OBJETIVOS .....	9
<b>2.0 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA MEDICIÓN DEL AGUA</b>	<b>9</b>
2.1 GENERALIDADES .....	9
2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA MEDICIÓN DEL AGUA .....	9
2.3 CONCEPTOS Y DEFINICIONES .....	11
2.4 IMPORTANCIA .....	13
2.5 CALIBRACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MEDICIÓN .....	15
2.5.1 Métodos de Medición .....	15
<b>3.0 EQUIPOS O INSTRUMENTOS PARA CALIBRACIÓN</b>	<b>17</b>
3.1 MOLINETES	17
3.1.1 Introducción .....	17
3.1.2 Descripción del Instrumento .....	17
3.1.3 Calibración de Laboratorio .....	22
3.1.4 Calibración de Campo .....	24
3.1.5 Medición .....	24
3.2 MEDIDORES DE CARGA DE VELOCIDAD	28
3.2.1 Introducción .....	28
3.2.2 Descripción de la Estructura .....	28
3.2.3 Calibración .....	29
3.2.4 Medición .....	29
3.3 MEDIDORES ULTRASÓNICOS	30
3.3.1 Introducción .....	30
3.3.2 Descripción del Equipo .....	30
3.3.3 Calibración en Laboratorio .....	32
3.3.4 Medición .....	32

	<b>Pág.</b>
3.4 MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS	33
3.4.1 Introducción.....	33
3.4.2 Descripción del Instrumento.....	33
3.4.3 Calibración en Laboratorio.....	34
3.4.4 Medición.....	34
3.5 MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL	34
3.5.1 Introducción.....	34
3.5.2 Descripción de la Estructura.....	34
3.5.3 Calibración en Laboratorio.....	35
3.5.4 Medición.....	35
<b>4.0 ESTRUCTURAS DE AFORO</b>	<b>36</b>
4.1 ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS	36
4.1.1 Introducción.....	36
4.1.2 Descripción de la Estructura.....	36
4.1.3 Calibración.....	38
4.1.4 Medición.....	39
4.2 MEDIDOR PARSHALL	40
4.2.1 Introducción.....	40
4.2.2 Descripción de la Estructura.....	40
4.2.3 Calibración Analítica.....	42
4.2.3.1 Funcionando como flujo libre.....	42
4.2.3.2 Funcionando como flujo sumergido.....	43
4.2.4 Calibración en el Campo.....	45
4.2.5 Medición.....	46
4.2.5.1 Medición en condición de flujo libre.....	46
4.3 AFORADOR SIN CUELLO	47
4.3.1 Introducción.....	47
4.3.2 Descripción de la Estructura.....	47
4.3.3 Calibración Analítica.....	49

**PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO EN SERVICIO PES II - ETAPA II**

	Pág.
4.3.3.1 Funcionando como flujo libre.....	50
4.3.3.2 Funcionando con flujo sumergido.....	52
4.3.4 Calibración en Campo.....	55
4.3.5 Medición.....	55
4.3.5.1 Medición en condición de flujo libre.....	55
4.3.5.2 Medición en condición de flujo sumergido.....	56
<b>4.4 VERTEDEROS DE CRESTA ANCHA (RBC)</b>	<b>57</b>
4.4.1 Introducción.....	57
4.4.2 Descripción de la Estructura.....	57
4.4.3 Calibración Analítica.....	58
4.4.4 Calibración en Campo.....	61
4.4.5 Medición.....	62
<b>4.5 VERTEDEROS</b>	<b>62</b>
4.5.1 Introducción.....	62
4.5.2 Descripción General de la Estructura.....	62
4.5.2.1 Términos empleados en la operación de vertederos.....	63
4.5.2.2 Condiciones necesarias para los vertederos de pared delgada..	64
4.5.3 Clasificación de los Vertederos.....	65
4.5.4 Vertederos Rectangulares Parcial y Totalmente Contraídos.....	65
4.5.4.1 Calibración analítica.....	67
4.5.4.2 Medición.....	68
4.5.4.3 Vertederos rectangulares sin contracciones.....	69
4.5.5 Vertederos Triangulares.....	70
4.5.5.1 Vertederos triangulares totalmente contraídos y con $\alpha = 90^\circ$ .....	71
4.5.5.2 Calibración analítica.....	72
4.5.5.3 Medición.....	73
4.5.6 Vertedero Cipolletti.....	73
4.5.6.1 Calibración.....	74
4.5.6.2 Medición.....	75
4.5.7 Calibración en Campo.....	76
<b>4.6 COMPUERTAS</b>	<b>76</b>
4.6.1 Introducción.....	76
4.6.2 Descripción de la Estructura.....	77
4.6.3 Consideraciones Técnicas para Calibrar compuerta.....	78



	Pág.
4.6.4 Calibración Analítica.....	79
4.6.4.1 Flujo sumergido.....	79
4.6.4.2 Flujo libre.....	80
4.6.5 Calibración en Campo.....	81
4.6.5.1 Flujo sumergido.....	81
4.6.5.2 Flujo libre.....	82
4.6.6 Medición.....	83
<b>4.7 TOMAS CON ORIFICIO DE CARGA CONSTANTE</b>	<b>84</b>
4.7.1 Introducción.....	84
4.7.2 Descripción de la Estructura.....	84
4.7.3 Calibración Analítica.....	85
4.7.4 Calibración en Campo.....	88
4.7.5 Medición.....	88
<b>4.8 SECCIONES DE CONTROL</b>	<b>89</b>
4.8.1 Introducción.....	89
4.8.2 Descripción de la Estructura.....	90
4.8.3 Calibración.....	92
4.8.4 Medición.....	92
<b>4.9 AFORO CON FLOTADOR</b>	<b>93</b>
4.9.1 Introducción.....	93
4.9.2 Descripción del Método.....	93
4.9.3 Medición.....	95
<b>4.10 MÉTODO VOLUMÉTRICO</b>	<b>95</b>
4.10.1 Introducción.....	95
4.10.2 Descripción del Método.....	95
<b>5.0 LA CALIBRACIÓN DENTRO DE LA GESTIÓN DEL AGUA</b>	<b>97</b>
5.1 INTRODUCCIÓN.....	97
5.2 SISTEMA ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.....	97
5.2.1 Establecimiento de Métodos y Formatos de Registro.....	97
5.3 EJECUCIÓN DE AFOROS Y MEDICIONES.....	97

	Pág.
5.4 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN.....	98
5.5 ENTREGA DE LA INFORMACIÓN PARA SER UTILIZADA EN LAS RUTINAS DE OPERACIÓN.....	98
5.6 DOCUMENTACION Y ARCHIVO.....	98
<b>6.0 CARTILLA DE CALIBRACION</b>	<b>99</b>
6.1 CARTILLA DE AFORO PARA MOLINETES	99
6.1.1 Introducción.....	99
6.1.2 Consideraciones Generales.....	100
6.1.3 Aforo.....	100
6.1.3.1 Sección de Control.....	100
6.1.3.2 Medición de Velocidades.....	102
6.1.3.3 Desarrollo del Aforo.....	103
6.2 CARTILLA PARA AFORO CON FLOTADOR	105
6.2.1 Introducción.....	105
6.2.2 Consideraciones Generales.....	105
6.2.3 Aforo.....	106
6.3 CARTILLA PARA AFORO CON RBC	109
6.3.1 Introducción.....	109
6.3.2 Consideraciones Generales.....	109
6.3.3 Aforo Analítico.....	110
6.3.4 Aforo Empleado Tablas.....	112
6.3.5 Aforo Empleado Gráficos.....	113
6.4 CARTILLA DE CALIBRACIÓN DE COMPUERTAS	115
6.4.1 Introducción.....	115
6.4.2 Consideraciones Generales.....	116
6.4.3 Calibración Analítica.....	116
6.4.3.1 Flujo sumergido.....	116
6.4.3.2 Flujo Libre.....	119
6.4.4 Calibración en Campo.....	119
6.4.4.1 Consideraciones Generales.....	119
6.4.4.2 Flujo Sumergido.....	119
6.4.4.3 Flujo Libre.....	122

# **INSTRUCTIVO TÉCNICO PARA CALIBRACIÓN DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE MEDICIÓN**

## **1.0 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Generalidades**

El presente documento técnico, constituye una de las actividades consideradas en el PES II - II ETAPA, para la extensión y consolidación de la operación y mantenimiento en las 64 Juntas de Usuarios de la Costa del país, que es su ámbito de acción, y que además puede ser de utilización en otras Juntas de los Distritos de Riego de costa, sierra y selva.

EL “Instructivo Técnico de Calibración de Estructuras Hidráulicas de Medición” desarrollado, es un documento que incluye tanto a los equipos de medición, como a las estructuras hidráulicas de medición más utilizadas en las diferentes Juntas de Usuarios de la Costa, para medir el agua en ríos o canales de derivación, conducción y distribución, así como en tuberías de sistemas de riego a presión o en plantas de bombeo de aguas superficiales o subterráneas.

El instructivo ha sido elaborado con bastante detalle y es fácil comprensión y está dirigido al personal encargado de la operación y mantenimiento de los sistemas de riego en J.U. y CR, (sectoristas, guardamayores, tomeros, jefes de operación y mantenimiento y Gerentes Técnicos) o personal contratado para la medición del agua y específicamente para la calibración de equipos y estructuras de medición más utilizados en cada JU o CR.

La medición del agua en los sistemas de riego que operan las JU y CR en la Costa del país, constituye una práctica constante ya sea con fines de pronóstico en las fuentes de agua o para controlar los volúmenes que se entregan a los usuarios en los canales de conducción y distribución o en las tomas de parcelas para lo cual los sistemas de riego deben contar con una red hidrométrica bien planificada con puntos de control diversos, tales como: estaciones hidrométricas en el río y presas de almacenamiento, compuertas de bocatoma, tomas en el canal principal, caídas, vertederos, medidores (Parshall, Sin cuello y RBC), etc. En este sentido el PES II realiza un monitoreo a la instalación de redes de puntos de control y construcción de estructuras de medición, enseñando a calibrar inclusive a las estructuras existentes, siendo el presente instructivo una herramienta de reforzamiento de las acciones iniciadas por el PSI.

El instructivo ha utilizado principalmente métodos analíticos sin empleo de computadora, sin embargo ésta posibilidad está abierta y es perfectamente aplicable el software SIRIG II ingresando a su sección “C”, Hidrometría, que incluye la rutina de calibración de estructuras; para este fin es necesario que la información de aforos se registre en formatos adecuados para su procesamiento en computadora.

## **1.2 Objetivos**

El principal objetivo del instructivo de calibración es lograr que las mediciones de agua entregada a los usuarios sean las más aproximadas posibles a la realidad, lo que logra con equipos y estructuras debidamente calibrados. Una medición del agua precisa, conlleva a una mejor eficiencia en la distribución y en una mayor confiabilidad en la recaudación de la tarifa, que hoy por hoy, no guarda relación con los volúmenes de agua realmente entregados a los usuarios.

## **2.0 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA MEDICIÓN DEL AGUA**

### **2.1 Generalidades**

Para realizar mediciones del agua se requiere conocer de ciertos fundamentos y conceptos hidráulicos; no es el propósito de este manual ahondar en conceptos teóricos, sino más bien, se busca elaborar un manual de fácil acceso e interpretación.

En términos prácticos, los flujos se pueden diferenciar en dos clases:

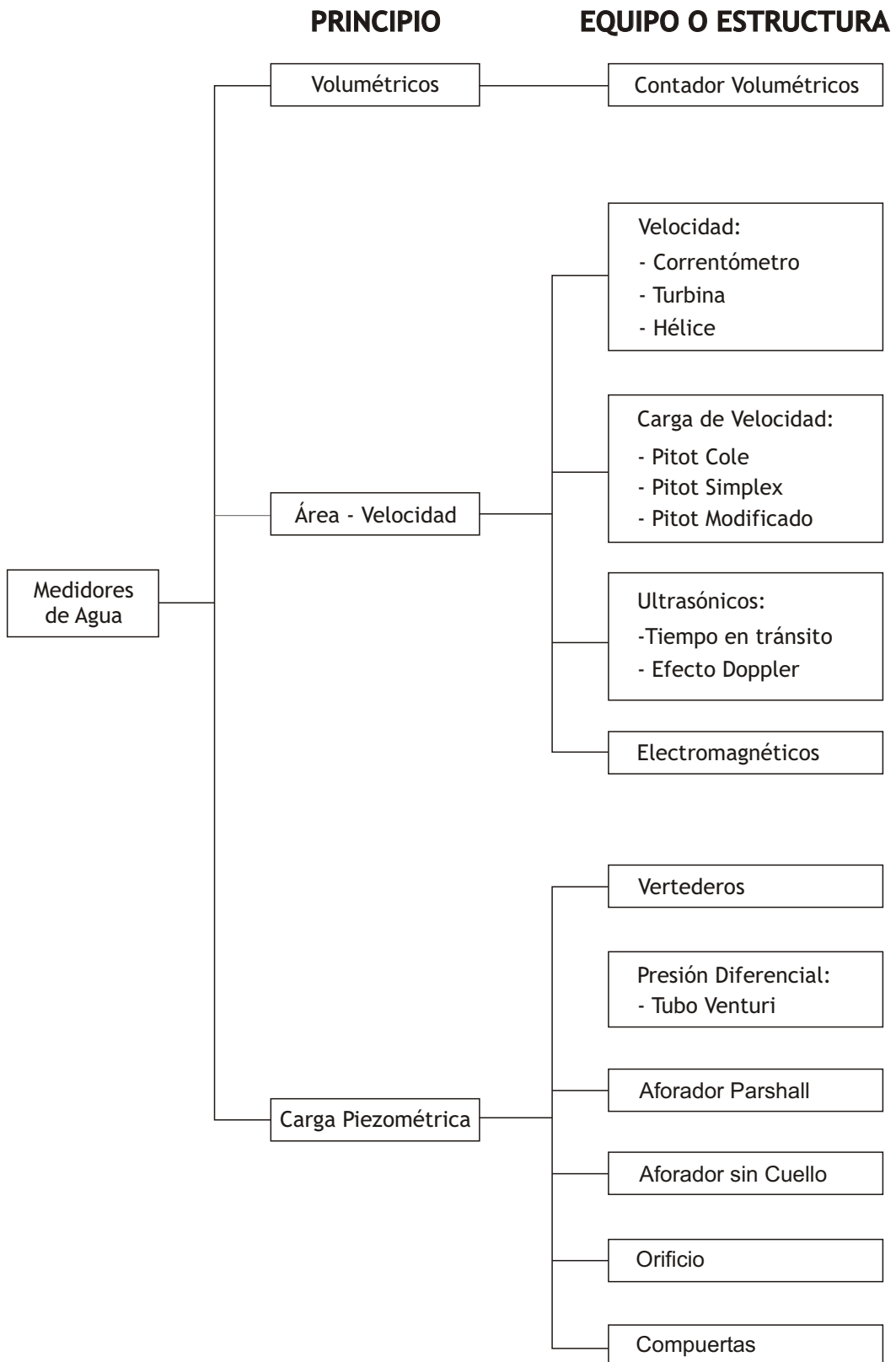
- a) **Flujos a superficie libre**, a los que también se les llama flujos de gravedad; un ejemplo de este tipo de flujo son los canales de riego y los conductos que transportan agua sin llenar su sección, tales como drenes y desagües urbanos.
- b) **Flujos a presión**, se les conoce también como flujos a conducto lleno y se caracteriza por que el agua que fluye por el conducto llena la sección y tiene una carga de energía; un ejemplo de este tipo de flujos se presenta en los conductos como sifones y en tuberías de sistemas de riego a presión, plantas de bombeo y en instalaciones de agua domiciliaria.

### **2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA MEDICIÓN DEL AGUA**

Existe una gran variedad de instrumentos y estructuras para la medición del agua, los que se han agrupado de acuerdo al principio de funcionamiento en el siguiente esquema:

En la práctica no todos los medidores que se presentan en el esquema anterior, son usados en las JU y CR. La preferencia por el uso de un medidor con respecto a otro, está asociado a las características del medidor, al costo del equipo y a su necesidad frecuente.

## ESQUEMA DE CLASIFICACION DE INSTRUMENTOS O ESTRUCTURAS DE MEDICION DE ACUERDO AL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO



## **2.3 CONCEPTOS Y DEFINICIONES**

Estos de han tomado del Manual de Hidrometría porque no viene al caso incorporar nuevos conceptos.

La Hidrometría se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería.

En forma clásica, se define la hidrometría como la parte de la hidrología que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo dentro de una sección transversal de flujo.

La hidrometría aparte de medir el agua, comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de riego, sistema de una cuenca hidrográfica, sistema urbano de distribución de agua. En el contexto del PES la hidrometría tiene dos propósitos generales:

- a) Conocer el volumen de agua disponible en la fuente (hidrometría a nivel de fuente natural);
- b) Conocer el grado de eficiencia de la distribución (hidrometría de operación).

### **Sistemas Hidrométricos**

Es el conjunto de pasos, actividades y procedimientos tendientes a conocer (medir, registrar, calcular y analizar) los volúmenes de agua que circulan en cauces y canales de un sistema de riego, con el fin de programar, corregir, mejorar la distribución del agua. El sistema hidrométrico tiene como soporte físico una red hidrométrica.

### **Red Hidrométrica**

Es el conjunto de puntos de medición del agua estratégicamente ubicados en un sistema de riego, de tal forma que constituya una red que permita interrelacionar la información obtenida.

### **Punto de Control**

Son los puntos donde se registran los caudales que pasan por la sección.

Los puntos de control son de gran variedad de tipos, como: estaciones hidrométricas en el río, la presa de almacenamiento, las compuertas de la estructura de captación o de toma, las obras de toma del canal principal, las caídas, vertedero, medidor Parshall, etc.

## **Registro**

Es la colección de todos los datos que nos permiten cuantificar el caudal que pasa por la sección de un determinado punto de control.

El registro de caudales y volúmenes de riego se ejecuta de acuerdo a las necesidades de información requeridas para la gestión del sistema. Los registros se efectúan en el momento de realizar el aforo o mediciones en miras o reglas, dependiendo del método de aforo.

Dependiendo de la ubicación del punto de control, los registros obtenidos son:

- Registro de los caudales en ríos de la cuenca hidrográfica.
- Registro de salidas de agua de los reservorios.
- Registro de caudales captados y que entran al sistema de riego.
- Registro de distribución de caudales de agua en canales del sistema de riego.
- Registro de caudales entregados para el riego en parcela.

## **Reporte**

Es el resultado del procesamiento de un conjunto de datos obtenidos, en el cual normalmente una secuencia de caudales medidos se convierte en un volumen por período mayor ( m<sup>3</sup>/día, m<sup>3</sup>/mes, etc..)

## **Medición de agua**

La medición del caudal o gasto de agua que pasa por la sección transversal de un conducto (río, riachuelo, canal, tubería) de agua, se conoce como aforo o medición de caudales. Este caudal depende directamente del área de la sección transversal a la corriente y de la velocidad media del agua.

La fórmula que representa este concepto es la siguiente:

$$Q = A \times V$$

Donde:

- Q : Caudal o Gasto.
- A : Área de la sección transversal.
- V : Velocidad media del agua en el punto.

## **2.4 IMPORTANCIA**

La función principal de la hidrometría es proveer de datos oportunos y veraces que una vez procesados proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y evaluación del manejo del agua en un sistema de riego.

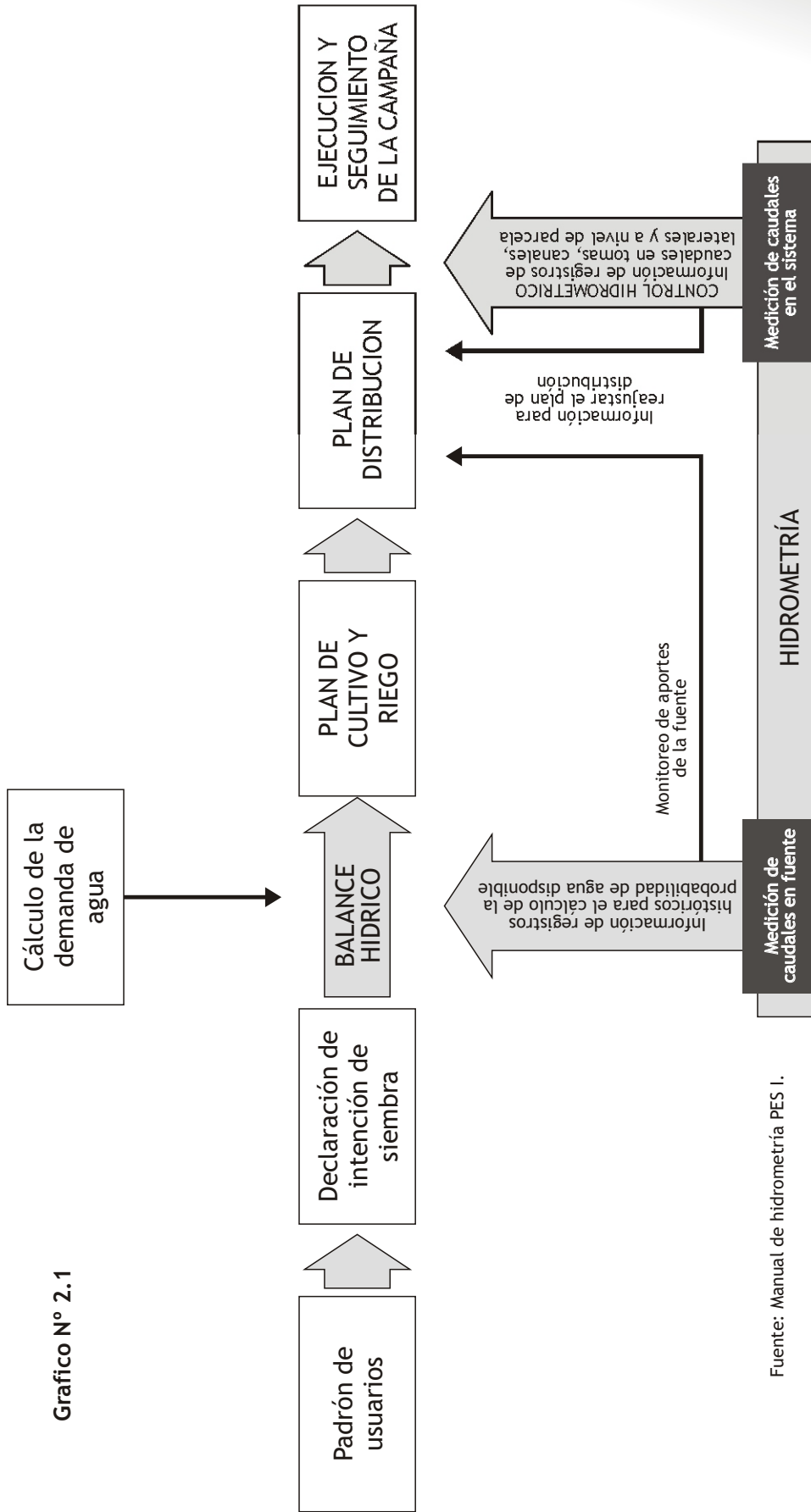
El uso de una información ordenada nos permite:

- a) Dotar de información para el ajuste del pronóstico de la disponibilidad de agua. Mediante el análisis estadístico de los registros históricos de caudales de la fuente (río, aguas subterráneas, etc.), no es posible conocer los volúmenes probables de agua que podemos disponer durante los meses de duración de la campaña agrícola. Esta información es de suma importancia para la elaboración del balance hídrico, planificación de siembras y el plan de distribución del agua de riego.
- b) Monitorear la ejecución de la distribución. La hidrometría proporciona los resultados que nos permiten conocer la cantidad, calidad y la oportunidad de los riegos; estableciendo si los caudales establecidos en el plan de distribución son los realmente entregados y sobre esta base decidir la modificación del plan de distribución, en caso sea necesario.
- c) Además de los anteriormente la hidrometría nos sirve para determinar la eficiencia en el sistema de riego y eventualmente como información de apoyo para la solución de conflictos.

El siguiente gráfico muestra la ubicación y la relación de la hidrometría con la rutina de operación del sistema.



## LA HIDROMETRÍA EN LA OPERACION DEL SISTEMA DE RIEGO



## 2.5 CALIBRACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MEDICIÓN

Siendo el agua un recurso de valor económico, su medición en forma precisa resulta de primordial importancia y para esto es indispensable contar con una red de puntos de control con estructura debidamente acondicionadas y calibradas.

La calibración de equipos y estructuras de medición es una actividad de preparación o verificación sobre el estado de confiabilidad de la estructura para medición del agua en forma precisa, que consiste en la realización de aforos del canal o cauce con diferentes caudales, para establecer relaciones de caudal vs altura del tirante en una mira graduada instalada en la sección de control, lo que constituye la curva de calibración utilizada posteriormente para la determinación de caudales en forma simplificada, es decir que el caudal se determina a partir de la curva de calibración con el dato de la lectura de la altura de la mira graduada.

### 2.5.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN

Los métodos de aforo más utilizados en canales y ríos son:

- **Velocidad Sección:** correntómetro, flotador, secciones de control, tubos Pitot, equipos ultrasónicos y electromagnéticos.
- **Carga Piezométrica (Estructuras Hidráulicas):** Orificios, vertederos, aforadores Parshall, sin cuello y RBC, etc y tubo Venturi.
- **Método Volumétrico:** Hidrómetros, depósitos de volumen conocido.

15

En la siguiente tabla, se muestra el rango de utilización de operación de estructuras de medición.

<b>Estructura</b>	<b>Método de calibración</b>	<b>Tipo de flujo</b>	<b>Perdida de carga mínima (m)</b>	<b>Rango gastos Q, Q<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>
Aforador de garganta larga y vertedor de cresta ancha	C - M C - C	Libre	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q <sub>i</sub> < 5.0
Aforador Parshall	C - M C - C Estándar	Libre y Ahogado	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q < 90
Aforador Venturi	C - M C - C	Libre	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q < 0.15
Vertedor Cipolletti	C - M C - C Estándar	Libre	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q <sub>i</sub> < 0.80
Vertedor Rectangular	C - M C - C Estándar	Libre	> 1.0 h <sub>1</sub>	Q < 90 Q <sub>i</sub> < 0.161
Vertedor Triangular	C - M C - C Estándar	Libre	---	Q <sub>i</sub> < 0.12
Compuerta Radial	C - M C - C	Libre Ahogada	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q <sub>i</sub> < 2.5
Compuerta Plana	C - M C - C	Libre Ahogada	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q <sub>i</sub> < 2.0
Orificio de Carga constante	C - M C - C Estándar	Ahogado	> 0.3 h <sub>1</sub>	Q < 2.0

Las variables presentadas en la columna “método de calibración” significan:

- Q : Caudal Máximo que puede ser aforado, ( $m^3/s$ ).  
Q<sub>i</sub> : Caudal intermedio que comúnmente se afora, ( $m^3/s$ ).  
h<sub>1</sub> : Carga hidráulica de la estructura, (m).  
C M : Calibración matemática.  
C C : Calibración en campo.  
Estándar : Significa que existen estructuras con dimensiones tipo, proporcionados por el *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*, en su publicación “**WATER MEASUREMENT MANUAL: A WATER RESOURCES TECHNICAL PUBLICATION**”, reimpresso el año 2001.

A continuación se describen en forma los medidores de caudal más utilizados en la medición de agua de riego:

**a) Vertederos**

Dentro de los vertederos existen tres tipos, y se clasifican según la forma de su sección, es así que podemos encontrar vertederos rectangulares, trapezoidales (Cipolletti) y triangulares; el caudal en los vertederos se obtiene de medir la carga que existe sobre su cresta y luego convertirla a su equivalente en caudal mediante el empleo de un ábaco o una tabla de caudales elevaciones.

**b) Canales - Aforadores**

En el caso de estos aforadores los tipos más comunes son: el Parshall, el aforador sin cuello y el aforador RBC; este tipo de estructuras determina el caudal Q en función de la profundidad del tirante de agua; cuando el aforador funciona como flujo libre basta con medir el tirante del agua al ingreso del aforador, caso contrario (flujo sumergido) es necesario conocer el nivel del agua a la entrada y a la salida del aforador.

**c) Orificios**

Las estructuras que funcionan como orificio, funcionan bajo dos condiciones; la primera cuando el orificio es sumergido y la segunda cuando el orificio funciona a flujo libre. Tanto para el flujo sumergido como para el flujo libre, se emplea la misma ecuación de descarga, cambiando solamente el coeficiente de descarga C; el coeficiente C es mayor cuando la descarga es libre y menor cuando la descarga es sumergida, lo anterior significa que cuando se tiene una estructura funcionando sumergida el caudal es menor, que cuando funciona a descarga libre. Las estructuras más comunes que funcionan como orificio son: las tomas, las compuertas, los medidores de presión diferencial (Venturímetros) y los medidores de carga diferencial (tubos Pitot).

**d) Correntómetros**

Son instrumentos que miden la velocidad de la corriente, y el más popular de todos ellos es el molinete. El molinete es un instrumento que posee un mecanismo que cuenta el número de vueltas de su hélice, para luego asociarlo a la velocidad de la corriente donde se encuentra sumergida. Además de los molinetes existen otros medidores de velocidad como son las propelas y las turbinas; el uso de éstos últimos no son comunes en la irrigación, pero son muy usados en los laboratorios y sirven para calibrar otros instrumentos.

**e) Medidores de velocidad.**

Adicionalmente a los instrumentos de medición descritos arriba, existen otros métodos para medir los caudales en canales; dichos métodos son: (a) el flotador, que permite obtener la velocidad del flujo, contabilizando el tiempo que se demora un objeto flotante en recorrer una determinada longitud; el caudal se obtiene al multiplicar la velocidad obtenida por el área hidráulica de la sección; (b) los trazadores, este método es similar al flotador, pero en lugar de sumergir un objeto flotante, lo que se hace es dejar caer al agua un trazador, que puede ser una tinta o alguna otra sustancia que se pueda transportar por el agua, luego se determina la velocidad y después el caudal, de forma similar al método del flotador.

**3.0 EQUIPOS O INSTRUMENTOS PARA CALIBRACIÓN**

**3.1 MOLINETES**

**3.1.1 INTRODUCCIÓN**

Son instrumentos muy utilizados para medir velocidades en ríos y canales. Los modelos más comunes de molinetes son dos, el de eje vertical y el molinete con hélice en su eje horizontal.

La ventaja del empleo de molinetes para medir caudales, es que no se requiere obstruir el cauce y son muy apropiados para aforar secciones muy grandes. El manejo del molinete no lo puede realizar cualquier persona, se requiere de cierto grado de conocimiento y criterio de operación, que se adquiere por la preparación y experiencia del personal de las CR o JU.

**3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO**

Los molinetes son instrumento que sirven para medir las velocidades que pasan por una determinada sección (canal o cauce); conociendo la velocidad y la sección del cauce (área) se determina al caudal o caudal, aplicando la ecuación (3-1):

$$Q = V \times A \quad \dots(3-1)$$

Donde:

- Q : Caudal que pasa por la sección de aforo, (m<sup>3</sup>/s).
- V : Velocidad media de la corriente, (m/s).
- A : Área de la sección hidráulica del canal o cauce, (m<sup>2</sup>).

Existen dos tipos de molinete, el de eje vertical y el de eje horizontal, a continuación se describe a cada uno de ellos.

- a) **Molinete de eje vertical**, es un dispositivo de medición que posee un conjunto de copas fijadas a un eje vertical, cuando el molinete se sumerge a una corriente, las copas que se encuentran en dirección del flujo se mueven sobre su eje, el numero de vueltas que dan sobre el eje son contabilizadas y almacenadas por un mecanismo dentro del aparato, luego se convierte a su equivalente en velocidad mediante el empleo de la ecuación de calibración del molinete. En la Figura N° 3.1 se aprecia una vista de este tipo de molinete.

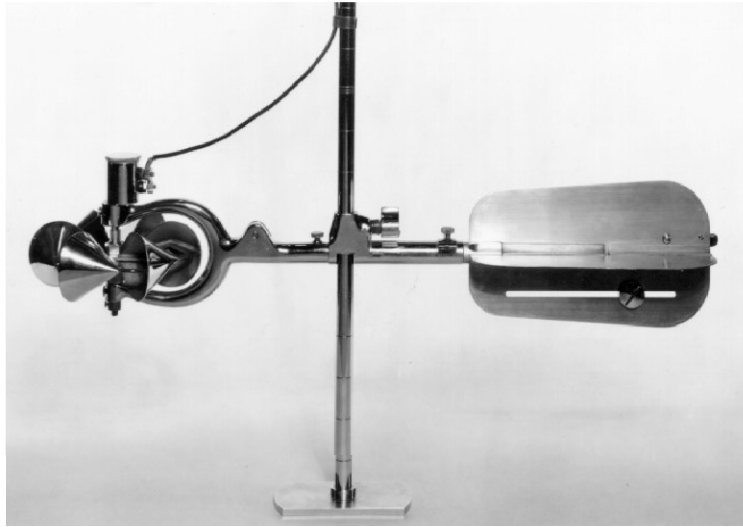


Figura N° 3.1: Molinete de Eje Vertical tipo PRICE AA

Las ventajas de los molinetes de eje vertical son:

- Su manejo es más sencillo y puede ser utilizados por operadores menos especializados.
- Puede operar hasta velocidades de 3 a 4.5 m/s.

Las desventajas de este tipo de instrumento son:

- Son muy sensibles a las perturbaciones, tales como la proximidad a las orillas. Ofrece una mayor resistencia del flujo al agua.

- b) **Molinete con hélice y eje horizontal**, este instrumento cuenta con un hélice ubicado sobre su eje horizontal, este equipo funciona contando el número de vueltas que da el hélice sobre el eje horizontal, para luego convertir el número de vueltas a su equivalente en velocidades, mediante una ecuación de calibración. En la Figura N° 3.2 se presenta una vista de molinete con hélice.

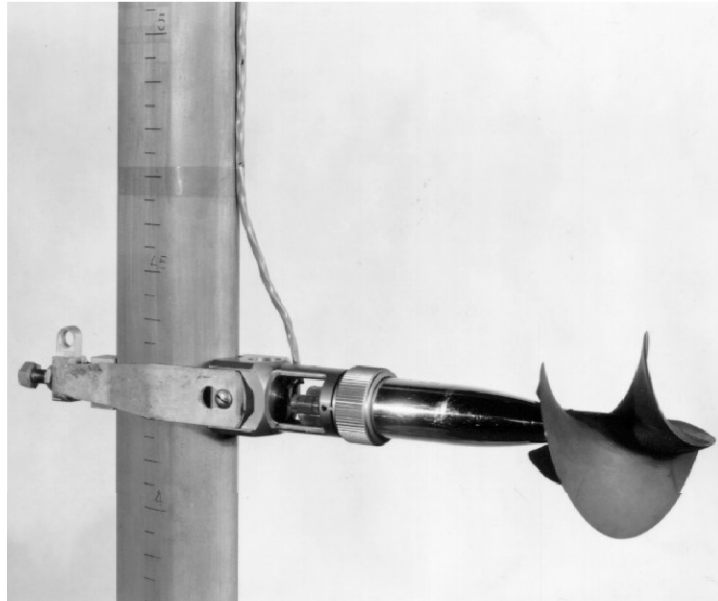


Figura N° 3.2: Molinete con Hélice y Eje Horizontal tipo Dumas.

Las ventajas del uso de este molinete son:

- Se usa para velocidades hasta de 9 m/s.
- Puede ser construido en tamaños pequeños (hasta 6.5 cm), esto permite aforar muy bien cerca de las paredes del canal.
- Tiene menos posibilidades de atascarse en hierbas y cuerpos que flotan.
- Por su forma hidrodinámica presentan menos arrastre al flujo.
- Son muy recomendados para el aforo de ríos.

Anteriormente se han clasificado a los correntómetros por la forma de su funcionamiento, es decir molinetes de eje vertical y eje horizontal con hélice; pero también se puede hacer una clasificación en función de la forma de cómo se realiza las mediciones en campo, de los que se conocen los siguientes tipos:

- a) **Medición con molinete andando sobre el agua**, Esta medición la realiza un operador andando sobre el cauce del río, y bajo esta condición el molinete se encuentra sujetado por un bastón (bastón corto); por lo general esta medición se practica en cauces pocos profundos y con velocidades bajas. En la Figura N° 03 se tiene una vista de la forma de medir empleando esta técnica.



**Figura N°3.3:** Medición con Molinete Andando sobre el Cauce

- b) **Medición soportando el molinete con cable,** Esta medición se realiza cuando no es posible aforar caminando por el río, debido a lo encañonado del cauce o lo peligros que pueda generar las corrientes contra los operadores. La medición consiste de sujetar el molinete sobre un cable que ha sido fijado de extremo a extremo del río tal como se ve en la Figura N° 04.

**20**



**Figura N° 3.4:** Medición con Molinete Soportado en un Cable

- c) **Medición con molinete desde un puente,** Muchas veces las secciones de los puentes son usadas como secciones de control, por lo que es posible y factible emplear el molinete sujetando desde el mismo puente, tal como se ve en la Figura N° 05.



**21**

**Figura N° 3.5: Medición con Molinete desde un Puente**

- d) **Medición con molinete desde un bote**, Cuando el ancho del cauce sea demasiado extenso que no permita el aforo con cables o si se desea aforar corrientes en lagos, es posible lograr el aforo colocando el molinete dentro de un bote, tal como se ve en la Figura N° 06.



**Figura N° 3.6: Medición con Molinete sobre Bote**



### **3.1.3 CALIBRACIÓN DE LABORATORIO**

Por lo delicado que son los mecanismos de molinetes y buscando garantizar su precisión, se recomienda que la calibración se realice en un laboratorio que este acreditado para realizar este tipo de trabajo. En el Perú uno de los laboratorios que realiza la calibración es el de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

En el laboratorio los molinetes se calibran sobre un canal que cuenta con un dispositivo (carrito) que mueve al molinete a una velocidad constante. El canal se debe encontrar bajo un movimiento en régimen uniforme, y su sección debe ser homogénea. La velocidad con que se mueve el molinete está asociada a la rotación de su hélice, el cual se graba en un contador; luego conociendo el número de vueltas de la hélice y conociendo también la velocidad con que se mueve el molinete, se obtiene una relación del número de vueltas del hélice con la velocidad del molinete.

Para calibrar un molinete se requiere medir simultáneamente la distancia recorrida por el carro, el número de vueltas de la hélice del molinete y el tiempo. Para calibrar un molinete se debe considerar lo siguiente:

- a) Antes de sumergir el molinete al agua, se debe verificar su limpieza, lubricación y funcionamiento (mecánico o eléctrico).
- b) El modo de establecer el molinete en el agua, debe ser igual a la forma en que será usado para las mediciones in situ.
- c) La profundidad a la que se coloca el molinete debe ser tal que la influencia de la superficie sea despreciable o no la afecte. Para un molinete de hélice con eje horizontal, la profundidad de la superficie libre del líquido al centro de rotación, debe ser por lo menos dos veces el diámetro del hélice; cuando el molinete tiene el hélice en el eje vertical, la profundidad de sumergencia no debe ser menor a 0.3 m ó 1.5 veces la altura del rotor.
- d) Si se calibran varios molinetes simultáneamente, se debe verificar que no ocurran interferencias entre ellos.
- e) El agua dentro del la poza de calibración debe encontrarse relativamente tranquila antes de cada prueba. El tiempo de espera debe escogerse de modo que los vestigios de velocidad sean despreciables en comparación con la velocidad del ensayo siguiente.

Para determinar la ecuación de calibración se desarrollan los siguientes pasos:

- a) De los ensayos en laboratorio se obtienen datos, tales como: la longitud (L) recorrida por el carro de calibración en un tiempo T, el número de vueltas (n) dada por la hélice del molinete en un tiempo T y el tiempo de análisis considerado para la medición de la longitud y el número vueltas. En la Tabla N° 3.1 se presentan los datos medidos en un laboratorio para la calibración de un molinete.

L (m)	n	T (s)
0.91	3	11.02
1.37	5	6.16
2.70	10	6.70
1.33	5	2.90
2.61	10	3.75
2.56	10	3.18
2.60	10	2.22
1.28	5	0.87
5.16	20	2.90
5.11	20	2.43
7.77	30	3.13

Tabla N° 3.1: Datos Obtenidos en un ensayo para Calibrar un Molinete

**23**

- b) Con los valores obtenidos en el paso anterior podemos determinar, la velocidad del flujo (V), así como la velocidad de rotación del hélice (N). Dichos valores se pueden ver en la Tabla N° 3.2.

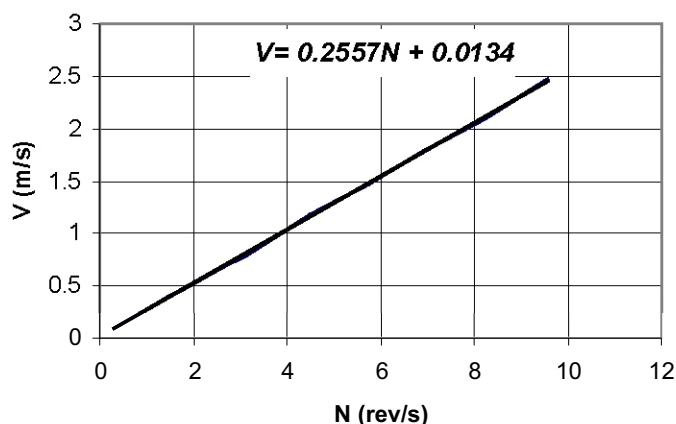
$$V = \frac{L}{T}, (m/s)$$

$$N = \frac{n}{T}, (rev/s)$$

N (rev/s)	V (m/s)
0.272	0.083
0.812	0.222
1.493	0.403
1.724	0.459
2.667	0.696
3.145	0.805
4.505	1.171
5.747	1.471
6.897	1.779
8.230	2.103
9.585	2.482

Tabla N° 3.2: Valores de la Velocidad de rotación del Hélice del Molinete vs la Velocidad del Flujo

- C) La Tabla N° 3.2 puede ser representada mediante una curva V vs N, tal como se ve en la Figura N° 3.3; a la curva obtenida se le puede someter a un análisis de regresión lineal y obtener la correlación “r”, si el coeficiente de correlación “r” es próximo a la unidad se dice que la curva de ajuste es muy precisa.



**Figura N° 3.7:** Curva de Ajuste N vs V, para un Molinete Calibrado en Laboratorio

- d) La curva de ajuste que se muestra en la Figura N° 3.3, se obtiene de una ecuación de regresión lineal (con  $r = 0.999$ ), que en este caso representa la ecuación de calibración del molinete, que en su forma general se expresa:

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

Donde:

V : Velocidad del flujo, (m/s).

N : Velocidad de rotación de la hélice del molinete, (rev/s).

a, b : Constantes obtenidas del análisis de regresión lineal.

- e) De los pasos descritos anteriormente, la ecuación de calibración se escribe:

$$V = 0,2557 N + 0,0134$$

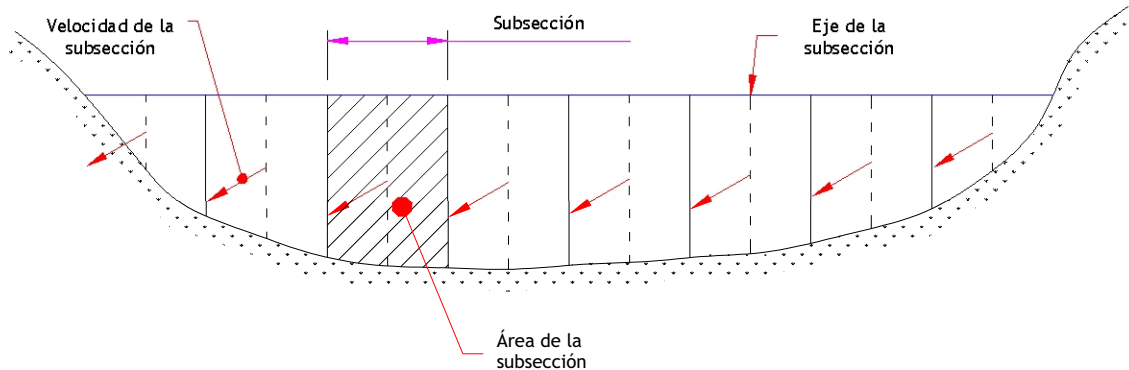
### 3.1.4 CALIBRACIÓN DE CAMPO

La calibración en campo de este tipo de instrumentos no es recomendada. Si la necesidad de calibrar en campo es imperiosa y si se cuenta con un canal donde se conoce la velocidad del flujo y la corriente es de aguas tranquilas, se puede calibrar el molinete, en función del número de revoluciones de su hélice, tal como se hace en los laboratorios.

### 3.1.5 MEDICIÓN

La medición de caudales empleando molinete, se fundamenta en el método área velocidad, donde el caudal se determina multiplicando la velocidad media del flujo

por el área hidráulica de la sección. La sección hidráulica del canal puede ser grande o pequeña y según su magnitud conviene dividirla en sub-secciones (ver Figura N° 3.4); a cada sub-sección se le determina su área y velocidad, y multiplicándolas se obtiene el caudal que pasa por la sub-sección. La suma de los caudales de cada sub-sección representa el caudal total que pasa por la sección.



**Figura N° 3.8:** Esquema de la Sección Transversal de un Canal que va a ser Aforado Empleando un Molinete

**25**

La sección escogida para aforar empleando un molinete debe cumplir con las siguientes características:

- Debe ser: regular, estable, bien definida y en lo posible no debe ser susceptible a la erosión o sedimentación.
- Se debe ubicar en un tramo recto y la longitud tiene que ser la suficiente como para garantizar el flujo uniforme.
- Se debe procurar que las velocidades del flujo sean perpendiculares a la sección transversal del canal.
- Las velocidades deben ser mayores a 0.10 m/s.
- No debe estar ubicada cerca a estructuras u obstáculos que produzcan remansos, para evitar el cambio de la distribución de velocidades del flujo.

Una vez escogida la sección se procede a medir sus características geométricas; para la medición del ancho del canal se emplea normalmente una cinta graduada de acero o un equipo de topografía; para la medición del tirante se puede utilizar una varilla metálica graduada o un cable graduado, con un peso en su extremo.

Según el tamaño y las características geométricas del canal, será conveniente dividir la sección en sub-secciones, tal como se ve en la Figura N° 3.4. El número de sub-secciones varía de acuerdo al ancho de la sección y a la irregularidad del fondo. En corrientes muy anchas y con profundidades uniformes, el número de sub-secciones pueden ser pocas; caso contrario, cuando los tirantes son variables y la sección no es homogénea, se recomienda dividir en más sub-secciones. Para realizar las subdivisiones de la sección se debe considerar lo siguiente:

- a) El ancho de la subsección no debe ser mayor a 1/15 ó 1/20 del ancho total de la sección.
- b) El caudal que pasa por cada subsección no debe ser mayor al 10% del caudal total.
- c) La diferencia de velocidades en la profundidad no debe ser mayor del 20% comparadas unas con otras.

Ancho de la sección (m)	Ancho de la subsección (m)
0.00 - 1.20	0.1
1.20 - 3.00	0.2
3.00 - 5.00	0.3
5.00 - 8.00	0.4
8.00 - 12.0	0.5
12.0 - 18.0	0.8
18.0 - 25.0	1.0
25.0 - 35.0	1.5
35.0 - 50.0	2.0
50.0 - 70.0	2.5
70.0 - 100.0	3.0
100 En adelante	4.0

Tabla N° 3.3: Ancho de la Sub-sección en Función del ancho del canal

La medición de las velocidades empleando el molinete se puede hacer de forma integral o de forma simplificada.

La medición integral es aquella que realiza varias mediciones en el eje vertical, esto permite, conocer la distribución de las velocidades en diferentes profundidades (perfil de velocidades); obtenido el perfil de velocidades se puede hallar la velocidad media de una forma más exacta. Para la medición de velocidades se debe considerar:

- a) Que el molinete este lo más cerca posible de la superficie, pero cuidando que la hélice del molinete se encuentre completamente sumergida.
- b) El molinete este lo más cerca posible del fondo, pero cuidar que el hélice pueda trabajar libremente, sin chocar con el suelo.
- c) Los puntos de medición intermedios sobre el eje vertical, deben ser mas seguidos cerca a la superficie y mas espaciados cuando se acerque al fondo.
- d) La cantidad necesaria de puntos de medición de velocidad sobre la profundidad se pueden hallar de la Tabla N° 3.4. y 3.5

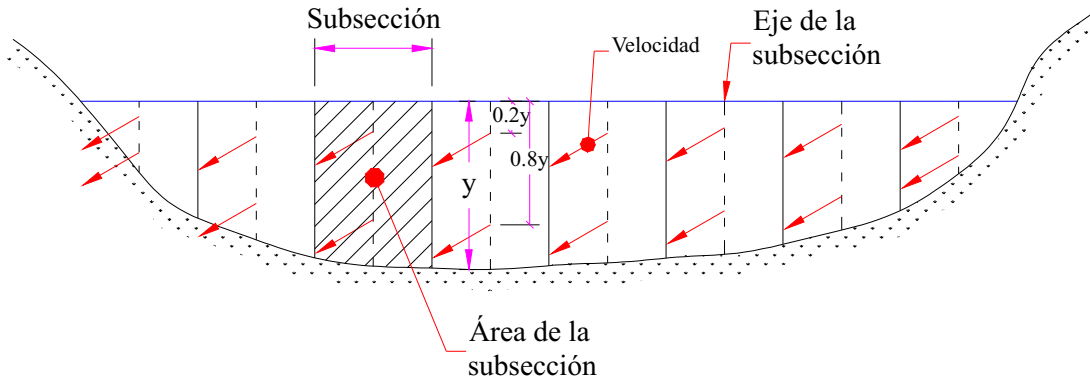
Tirante (m)	# de puntos de medición sobre la profundidad
Hasta 1.0	3 4
1.0 - 3.0	4 7
3.0 - 7.0	7 9
Más de 7.0	7 10

Tabla N° 3.4: Puntos de Medición sobre el Eje Vertical en Función del Tirante

Tirante y (m)	Profundidad de Medición (m)
< 0.15	y/2
0.15 0.45	0.6y
> 0.45	0.2y y 0.8y ó 0.2y, 0.6y y 0.8y

Tabla N° 3.5: Profundidad de Medición en Función del Tirante

Cuando no es posible tomar mediciones a lo largo del eje vertical (medición integral), es posible tomar mediciones de una forma mas simple, para ello se debe colocar el molinete en puntos específicos de la distribución vertical de velocidades. Si las características del molinete y la altura del tirante lo permiten, el método más conveniente para calcular la velocidad media consiste en promediar las mediciones hechas con el molinete a 0.2 y 0.8 del tirante (Método de 2 puntos), tal como se ve en la Figura N° 3.9:



**Figura N° 3.9:** Sección Transversal Indicando las Velocidades y Áreas de las Sub-secciones, para el Método de dos Puntos

**27**

Si no es posible realizar mediciones en dos puntos sobre la profundidad del tirante, por que éste es demasiado pequeño, se recomienda tomar la lectura del molinete a una profundidad de 0.6 veces el tirante, contados a partir de la superficie libre del agua. El problema de este tipo de mediciones es que la velocidad media obtenida es mayor a la velocidad real y por lo tanto el caudal es también mayor al real.

Cuando la distribución de las velocidades sobre el eje vertical es irregular, se recomienda tomar no menos de tres mediciones en la vertical. En este caso la velocidad media es igual al promedio de las velocidades medidas a 0.2, 0.6 y 0.8 veces el tirante, contados a partir de la superficie del agua.

Una vez dividida la sección transversal en sub-secciones, y habiendo indicado la forma de calcular la velocidad media en cada sub-sección, el caudal que pasa por la sección será igual a la suma de los caudales que pasan por cada sub-sección, la cual se puede escribir:

$$Q = A_1V_1 + A_2V_2 + A_3V_3 + \dots + A_nV_n \quad \dots (3-2)$$

Donde:

- Q : Caudal que pasa por la sección, (m<sup>3</sup>/s).
- A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>n</sub> : Área de la sub-sección 1, 2 y n respectivamente, (m<sup>2</sup>).
- V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>n</sub> : Velocidad en la sub-sección 1, 2 y n respectivamente, (m/s)

La ecuación (3-2) también se puede escribir como:

$$Q = \sum (V_i \times A_i)$$

Durante el aforo con molinete se deberá tener presente lo siguiente:

- a) Se deberá usar solamente molinetes calibrados.
- b) Siempre será necesario calibrar los molinetes según la forma de cómo están sujetados (vara o cable).
- c) En el caso de molinetes con cojines y cámara de aceite (Por ejemplo el A.OTT), se recomienda cambiar el aceite después de 4 horas de trabajo y cuando el aforo se realiza sobre agua turbia o cuando existe mucho sedimento fino en suspensión, el aceite se debe cambiar frecuentemente.
- d) Se debe emplear el aceite que recomienda o provee el fabricante del molinete, caso contrario se debe usar aceite ligero, sin residuos ácidos y otros contenidos abrasivos, el grado de viscosidad del aceite debe ser igual a 10.
- e) Antes de aforar se debe comprobar el buen estado y funcionamiento del molinete y sus accesorios. Cuando el aforo es largo, se recomienda verificar cada cierto tiempo su buen funcionamiento.
- f) Después de una sesión de aforo es necesario revisar todo el equipo de aforo, luego limpiarlo bien y guardarlo en un lugar seguro.
- g) En caso de molinetes sin uso por más de medio año, se deberá limpiar bien los cojinetes, para ello utilizar gasolina pura, con lo que se evita que el aceite del molinete se convierta en grasa.
- h) El molinete necesariamente tendrá que calibrarse cuando sufra deformaciones (desgaste del hélice) o alteraciones de cualquiera de sus componentes.

## **3.2 MEDIDORES DE CARGA DE VELOCIDAD**

**28**

### **3.2.1 INTRODUCCIÓN**

Son medidores utilizados en conducciones forzadas (tuberías). El más representativo de este tipo de instrumentos es el llamado tubo Pitot, que permite medir la velocidad de la corriente al ser introducido dentro del flujo. La instalación de este equipo es sencilla, pero se requiere contar con un dispositivo que fije el instrumento sobre la sección del canal.

El tubo Pitot funciona como un piezómetro, por que permite medir la carga hidráulica que pasa por una sección; dicha carga se convierte a velocidad mediante el empleo de una ecuación. Este dispositivo presenta problemas de precisión cuando el flujo es muy lento, tornándose difícil la toma de lecturas, así por ejemplo para producir 3 cm de carga se requiere una velocidad de 0.85 m/s.

### **3.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

El tubo Pitot es un instrumento sencillo compuesto por un dos tubos unidos por un codo en ángulo recto, tal como se muestra en la Figura N° 3.6. El tubo, que es introducido al flujo, posee un orificio que permite el ingreso del agua, con el fin de generar una carga piezométrica; se debe cuidar que el tubo introducido se encuentre dispuesto de forma paralela al sentido del flujo en el canal.

El tubo Pitot funciona de la siguiente manera. El agua que ingresa por el tubo, corre a través de él elevándose dentro del tubo vertical, hasta encontrarse en equilibrio, una vez en equilibrio podemos leer la altura piezométrica y mediante una ecuación de descarga convertir esa altura en su equivalente en velocidad. En la Figura N° 3.6 se observa un esquema del tubo Pitot.

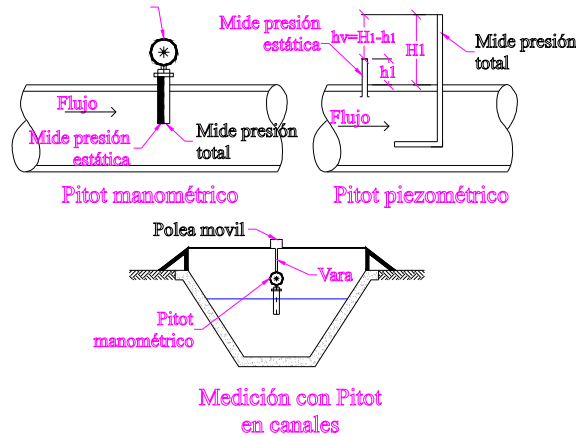


Figura N° 3.10: Esquema Típico de un Tubo Pitot

En la Figura N° 3.10,  $H_1$  es la carga total,  $h_1$  es la carga de presión, y  $h_v$  es la diferencia de carga, obtenido de sustraer la carga de presión de la carga total. La ecuación de la velocidad en el tubo Pitot se puede escribir como:

$$V = C \sqrt{2 g h_v} \quad \dots (3-3)$$

Donde:

- V : Velocidad de la corriente, (m/s).
- g : Gravedad terrestre, (m/s<sup>2</sup>).
- $h_v$  : Medición de la carga de velocidad en el tubo Pitot, (m).
- C : Coeficiente de descarga que se produce en el tubo Pitot.

El coeficiente  $C$  de la ecuación (3-3), en la mayoría de los casos es igual a la unidad, esto cuando la longitud del tubo sumergido sea lo suficientemente largo; cuando los tubos son cortos, inclinados, el valor de  $C$  necesariamente tendrá que ser calibrado. Algunos coeficientes  $C$ , son diferentes de la unidad y son proporcionados por el fabricante del instrumento.

### 3.2.3 CALIBRACIÓN

La calibración de los tubos Pitot es básicamente sobre el coeficiente  $C$  de la ecuación (3-3), el cual solo puede ser hecho en laboratorio, o caso contrario sobre una conducción en la cual se conozca la magnitud de la velocidad por otro medio de medición exacto.

### 3.2.4 MEDICIÓN

Para medir el caudal que pasa por una sección de una tubería a presión, empleando un medidor Pitot, se siguen los siguientes pasos:

- a) Fijar el tubo Pitot sobre la sección que se desea medir el caudal.
- b) Sumergir el tubo Pitot bajo la corriente, considerando que el tubo sumergido se encuentre dispuesto de forma horizontal y paralela a la conducción.



- c) Una vez sumergido el tubo Pitot, esperar que el flujo se eleve sobre el tubo vertical, hasta un punto en que se encuentre estable.
- d) Cuando la carga sobre el tubo Pitot se encuentra estable, se mide con un vernier o una wincha la altura de la carga, y luego reemplazándola en la ecuación (3-3), se obtiene la velocidad.
- e) La velocidad obtenida en el paso d), representa la velocidad media; con esta velocidad y conociendo el área de la sección del canal o tubo, se determina el caudal que pasa por la sección.

Con el tubo Pitot se pueden medir velocidades que van de 1.5 6.0 m/s. Una desventaja de usar este instrumento de medición es que cuando existe turbulencia, la frágil estructura vibra mucho impidiendo tomar lecturas apropiadas de las cargas de agua.

### **Ejemplo Canal**

Si se tiene un canal de sección rectangular con un ancho  $b = 0.30\text{m}$  y un tirante de agua  $Y = 0.18\text{m}$ , y una lectura  $h_v = 0.08\text{m}$  obtenidos de un medidor Pitot con  $C = 1$ , se pide determinar el caudal que pasa por la sección:

#### **Desarrollo**

- Se calcula el área hidráulica de la sección,  $A = 0.30 \times 0.18 = 0.054\text{ m}^2$ .
- La velocidad que pasa por la sección se halla con  $V = (2 \times 9.81 \times 0.18)^{0.5} = 1.88\text{ m/s}$
- El caudal es entonces:  $Q = 1.88 \times 0.054 = 0.10\text{ m}^3/\text{s}$

## **3.3 MEDIDORES ULTRASÓNICOS**

### **3.3.1 INTRODUCCIÓN**

Son instrumentos que están compuestos de sensores que envían y reciben señales de sonido de alta frecuencia, sobre el flujo en tuberías, con el fin de medir su velocidad.

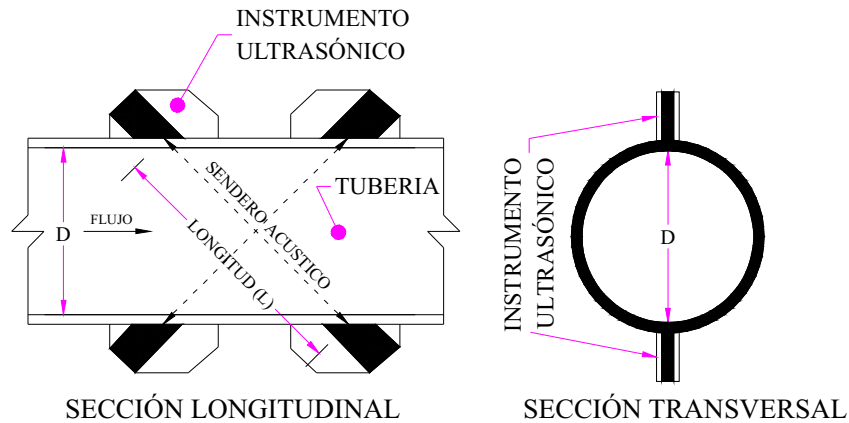
Fundamentalmente existen dos tipos de medidores ultrasónicos; los que funcionan midiendo el tiempo de travesía de la señal de onda y los que se fundamentan en el efecto DOPPLER. Generalmente son equipos de gran costo, pero tienen buena exactitud y gran flexibilidad de instalación.

### **3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

Existen dos tipos de equipos que miden la velocidad del flujo empleando ultrasonidos, los que cuentan el tiempo de la travesía y los que se fundamentan en el efecto DOPPLER.

#### **a) Ultrasonico tiempo en tránsito**

Este instrumento se fundamenta en el principio de transmitir una señal acústica sobre un sendero conocido, el cual cuando atraviesa un flujo, la velocidad de transmisión se ve afectada. En la Figura N° 3.11, se aprecia el esquema del funcionamiento de estos instrumentos.



**Figura N° 3.11:** Esquema del Funcionamiento de un Equipo Ultrasónico

Este tipo de instrumento permite medir velocidades en tuberías y no se requiere introducir el instrumento dentro de la corriente. El sistema funciona de la siguiente manera. El instrumento emite una señal acústica de alta frecuencia, y luego se espera el rebote (tiempo de tránsito) para contabilizar el tiempo de frecuencia; como también se conoce la longitud, es posible hallar la velocidad.

**31**

El empleo de este equipo posee las siguientes ventajas:

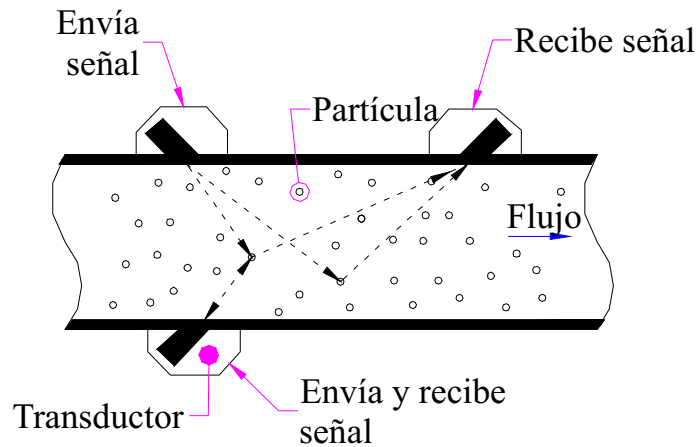
- Una alta exactitud, que puede ser logrado independientemente de la forma del perfil de velocidades.
- Se puede medir el flujo en dos direcciones.
- Como el equipo no requiere ser colocado dentro de la corriente no genera perdidas de carga.
- No requiere calibración en campo.
- El costo del instrumento es independiente de la dimensión de las secciones o tubos que se desea medir.

Las desventajas que posee este instrumento son:

- El costo inicial es muy alto.
- Requiere un servicio técnico especializado.
- Debe ser programado según el tipo de material que contiene la corriente.
- Es un aparato delicado, y requiere de mucho cuidado en su operación.

#### **b) Ultrasónico efecto Doppler**

Las mediciones empleando dispositivos Doppler, consiste en medir la velocidad de partículas que son transportadas por la corriente (ver Figura N° 3.12); en este método de medición hay que cuidar que las partículas en movimiento dentro del fluido, necesariamente tienen que poseer el mismo peso específico que el agua.



**Figura N° 3.12:** Medidores de Flujo Acústico tipo Doppler

Este dispositivo de medición es muy sofisticado, y es mejor utilizado en laboratorios que en campo, el dispositivo funciona de la siguiente manera. Se envía una señal acústica de frecuencia conocida, estas reflejan sobre las partículas y son grabadas sobre un receptor, las señales recibidas son analizadas resultado que la velocidad de las partículas es la misma que la del fluido.

**32**

Uno de los inconvenientes de los dispositivos que funcionan con efecto Doppler es que son altamente sensibles a las propiedades físicas de los fluidos, tales, como conductividad, la densidad de las partículas y el perfil del flujo.

### **3.3.3 CALIBRACIÓN EN LABORATORIO**

La calibración de estos instrumentos se debe hacer necesariamente en laboratorio, debido a lo complejo de su sistema de medición así como lo delicado de sus componentes.

### **3.3.4 MEDICIÓN**

Para medir el caudal empleando este instrumento se procede de la siguiente manera:

- a) Instalar el equipo en una zona adecuada, teniendo en cuenta que emite señales acústicas, se debe cuidar que no existan elementos que puedan perturbarlo.
- b) La velocidad se halla automáticamente en el equipo; con la velocidad obtenida, se procede a calcular el área hidráulica del canal. El producto de la velocidad por el área proporciona el caudal que pasa por la sección.

### 3.4 MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS

#### 3.4.1 INTRODUCCIÓN

Son instrumentos de medición que sirven para medir el flujo de agua en tuberías, cuentan con dos bobinas colocadas una a cada lado del cuerpo del aparato, que son excitadas por una corriente alterna produciendo así un campo electromagnético uniforme a través de la parte interna del tubo, conforme pasa el agua por el campo electromagnético se genera una inducción de voltaje que es percibida por dos electrodos diametralmente opuestos. La medición de la velocidad en este tipo de instrumentos está asociada a la relación que existe entre el cambio de voltaje y la velocidad.

El medidor es de acero inoxidable o de aluminio, recubierto de neopreno, plástico o cerámico; prácticamente no provoca pérdida de carga piezométrica, tiene mucha exactitud pero su costo es muy elevado.

#### 3.4.2 DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

Este tipo de medidores de corrientes, funcionan bajo el principio de producir voltajes que son proporcionales a la velocidad; en la Figura N° 3.9 se presenta un esquema de este tipo de instrumentos.

33



Figura N° 3.13: Medidor de Flujo Electromagnético

El sistema funciona de la siguiente manera. Se induce un voltaje mediante un conductor eléctrico, con esto se logra alterar el campo magnético, para un campo magnético fuerte, la magnitud del voltaje inducido es proporcional a la velocidad.

El equipo se instala sobre un tubo, luego se colocan dos bobinas magnéticas, uno a cada lado del tubo; luego se le coloca dos electrodos a cada lado, estos son los que inducen el voltaje. Los electrodos colocados deben de estar horizontales. El instrumento tiene un circuito eléctrico que le permite transformar el voltaje inducido a una relación de velocidad del flujo.

### **3.4.3 CALIBRACIÓN EN LABORATORIO**

Este instrumento solo puede ser calibrado en laboratorio, bajo las especificaciones del fabricante, sus dispositivos son muy sensibles por lo que se requiere revisarlo periódicamente.

### **3.4.4 MEDICIÓN**

Para medir el caudal empleando el medidor electromagnético, se procede como sigue:

- a) Se fija el equipo sobre el tubo que desea medir.
- b) Se toman las características geométricas del tubo para determinar el área interna.
- c) Se activan los impulsos electromagnético y luego se determina la velocidad.
- d) Multiplicando el área por la velocidad se determina el caudal que pasa por la sección.

## **3.5 MEDIDORES DE PRESION DIFERENCIAL**

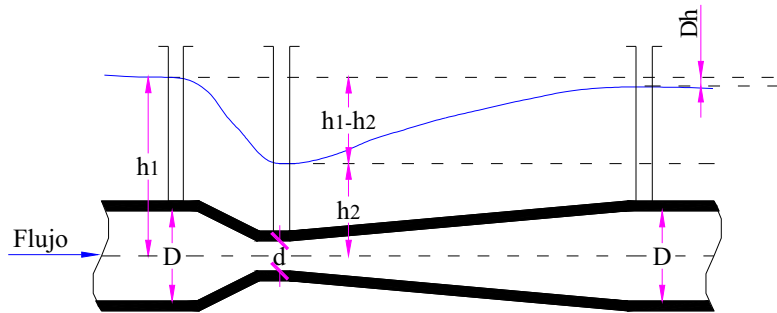
### **3.5.1 INTRODUCCION**

Los más representativos de este tipo de instrumento son los llamados tubo Venturi, sirven para medir caudales en tuberías. Estos aparatos consisten de un elemento que estrangula al flujo y crea un cambio en la carga piezométrica, que casi siempre se traduce en una pérdida de energía.

El costo de instalación de estos dispositivos es alto comparados con los tubo Pitot, sin embargo su exactitud es mejor, además de ser instrumentos más duraderos.

### **3.5.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

El venturímetro es uno de los instrumentos de mayor precisión para la medición de velocidades, este contiene partes fijas que requieren muy poco mantenimiento y su diseño causa muy pocas perdidas de carga. Es posible también preparar curvas de caudales vs cargas. El principal uso de los Venturi es para calibrar otras estructuras. En la Figura N° 3.14 se presenta un esquema de un medidor Venturi.



**Figura N° 3.14:** Esquema Típico de un Medidor Venturi

El coeficiente de descarga efectiva de los medidores Venturi va de 0.9 a 1.0, cuando se produce el flujo turbulento. Existen tubos Venturi desde 2 pulgadas, que son hechos de metal, también existen tubos Venturi de mayores dimensiones, pero como su uso no ha sido muy difundido no ha sido estandarizado y sus coeficientes no son muy conocidos. Una de las condiciones de uso del medidor Venturi es que el agua tiene que estar limpia para no atorar los conductos que posee.

En la actualidad existen muchas variaciones de los medidores Venturi y cada cual posee sus especificaciones de instalación y operación.

**35**

### **3.5.3 CALIBRACIÓN EN LABORATORIO**

Es preciso que este tipo de instrumentos de medición sea calibrada en laboratorios especializados; a pesar de que su mecanismo no es tan complicado como los otros medidores, siempre es necesario cerciorarse de su buen funcionamiento.

### **3.5.4 MEDICIÓN**

- a) Para medir caudales empleando el medidor Venturi hay que considerar que el flujo sea relativamente limpio y que no sea capaz de obstruir el ducto del medidor.
- b) Instalar el Venturi sobre la sección que se desea medir, luego obtener el valor de la velocidad.
- c) Conociendo la velocidad y el área de la sección hidráulica del tubo, se determina el caudal, según la ecuación del Venturi.

#### **4.0 ESTRUCTURAS DE AFORO**

##### **4.1 ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS**

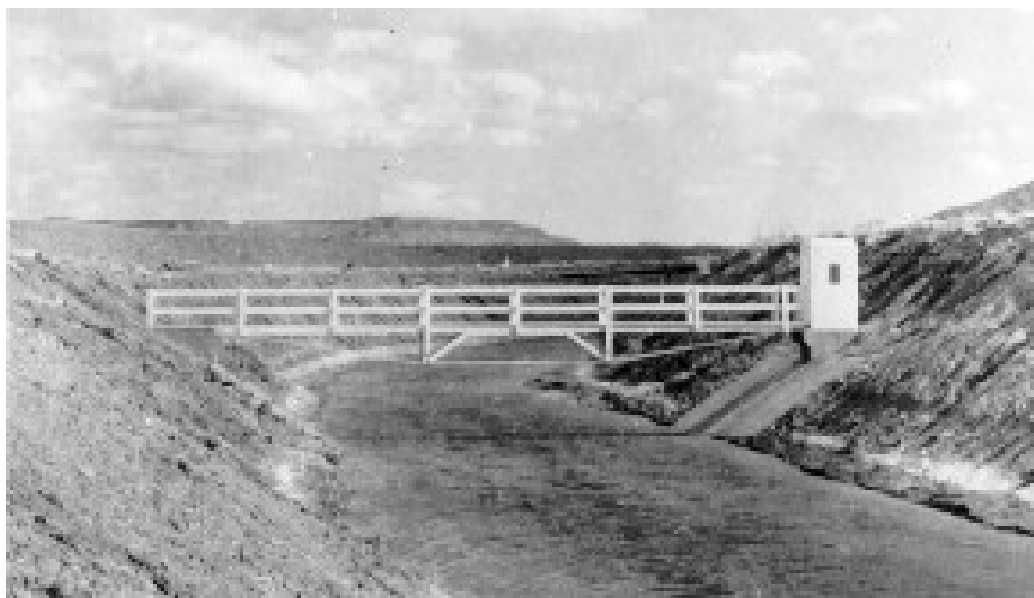
###### **4.1.1 INTRODUCCIÓN**

Una forma de aforar caudales o gastos, es empleando reglas graduadas a las que se les llama limnímetros. Estos pueden ser ubicados en estaciones fuera de la sección del canal o en secciones de canales debidamente acondicionadas, siempre y cuando cumplan con las condiciones requeridas para el uso de este tipo de aforador.

La instalación de este instrumento debe ser en tramos rectos, con secciones de canal uniformes, con taludes suaves y el fondo del canal debe de ser fijo. También se debe procurar que la ubicación de estos instrumentos esté alejada de construcciones o equipos que puedan generar perturbaciones a las mediciones. El rango de velocidades recomendados es de 0.10 a 2.0 m/s.

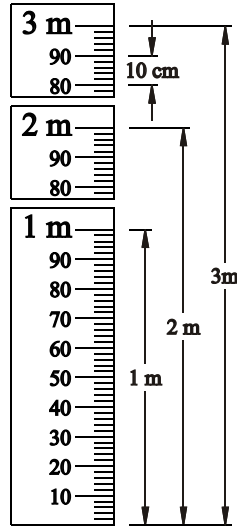
###### **4.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

El limnómetro puede estar ubicado sobre el canal o en una estructura llamada estación que está fuera de la sección de medición. En el primer caso el limnómetro se ubica sobre un puente debidamente acondicionado, lo suficientemente ancho para maniobrar y dar operación de mantenimiento a la regla. Cuando el limnómetro se ubica fuera de la sección del canal, éste se ubica sobre una caseta o al aire libre y esta conectado mediante tubos al canal; en la Figura N° 4.1 se presenta una vista de un canal para toma de medidas con limnómetro y otros.



**Figura N° 4.1:** Estación de Aforo sobre Canal, Vista de Aguas Arriba a Aguas Abajo, las lecturas se toman sobre el puente y en la caseta se guardan los instrumentos de calibración

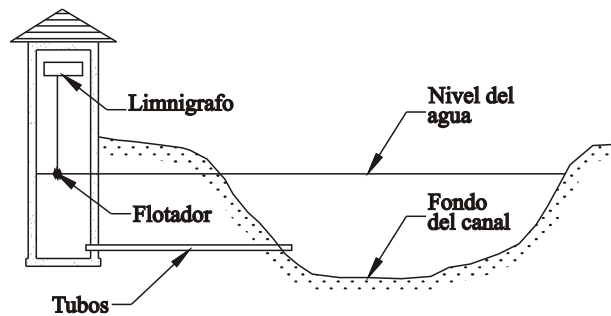
El material del que está hecho el limnómetro es por lo general acero, aunque en la actualidad la fibra de vidrio es lo más recomendado; en el caso en que la estructura no se ubique sobre un puente o en una estación, el limnómetro puede ser ubicado sobre la pared del canal, donde puede ser empotrado, grabado o dibujado. En la Figura N° 4.2 se presenta el esquema de un limnómetro; las letras deben de ser negras o rojas y el fondo blanco.



**Figura N° 4.2:** Esquema Típico de un Limnómetro

**37**

En la actualidad se cuenta con aparatos que realizan aforos de forma automática, a estos instrumentos se les llama limnógrafos. Ellos toman registros del nivel del agua mediante un flotador unido a una varilla, la cual al subir o bajar hace funcionar un dispositivo que grafica sobre un papel los cambios producidos en el nivel. En la Figura N° 4.3 se presenta una vista y esquema de los limnógrafos.



**Figura N° 4.3:**  
(a) Limnógrafo dentro de una Estructura de Madera,  
(b) Esquema del Funcionamiento de los Limnógrafos



### 4.1.3 CALIBRACIÓN

La calibración de limnómetros se realiza empleando un correntómetro u otro instrumento de aforo que nos permita conocer el gasto que pasa por la sección de la estación de aforo; los pasos a seguir son:

- Tomar las precauciones del caso, para que el trabajo de calibración se lleve sin contratiempos, y cerciorarse de que no existan riesgos ni a la vida ni a la salud de los operadores.
- Asegurarse que el limnómetro este bien instalado y que el correntómetro o instrumento de aforo a usar este funcionando perfectamente.
- Ubicar una sección en el canal próxima a donde se encuentra el limnómetro, que será el lugar de aforo de caudales, ayudados por un correntómetro u de otro dispositivo portátil de aforo; hay que tener cuidado de estar lo suficientemente alejado del limnómetro para no generar perturbaciones en sus lecturas, así como de asegurarnos que el correntómetro se encuentre ubicado en una sección adecuada para la medición.
- Para generar diferentes caudales sobre el canal, se requiere contar con una estructura de regulación aguas arriba, caso contrario la calibración será conforme ocurran diferentes caudales por el canal.
- Una vez determinada la zona de aforo con el correntómetro, empezar a tomar mediciones simultáneas en el nivel del limnómetro y con el correntómetro, y empezar a registrar las mediciones en una tabla, donde a cada nivel de agua en el limnómetro le corresponde un caudal. Luego construir una curva de caudal - elevaciones.
- El paso anterior se debe realizar por lo menos tres veces, para luego construir una curva de ajuste que sea el promedio de las mediciones hechas en campo.
- La curva de ajuste se construye de la siguiente manera (ver Figura N° 4.4). Sobre un papel que puede ser milimetrado se dibujan las curvas de elevaciones - caudales hechas con las mediciones de campo, sobre esas curvas (medidas en campo), se dibuja una curva que represente el promedio de las curvas graficadas. Finalmente la curva de ajuste puede servir para elaborar una tabla de elevaciones caudales (ver Tabla N° 4.1).

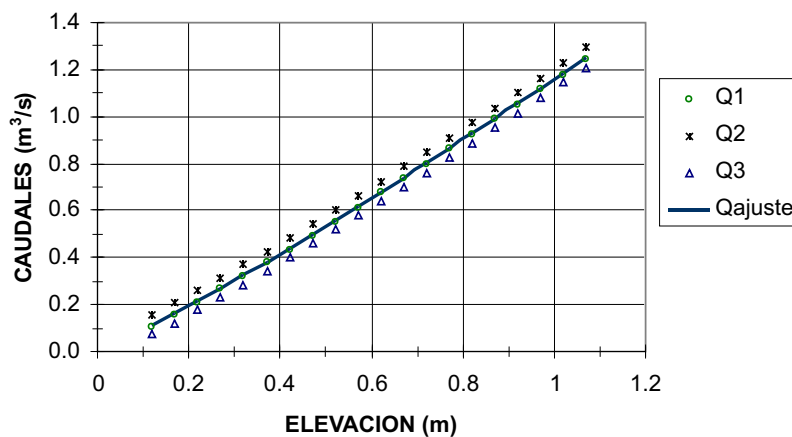


Figura N° 4.4: Curva de Ajuste (Calibración) Obtenidas del Promedio de Curvas Obtenidas con Correntómetro

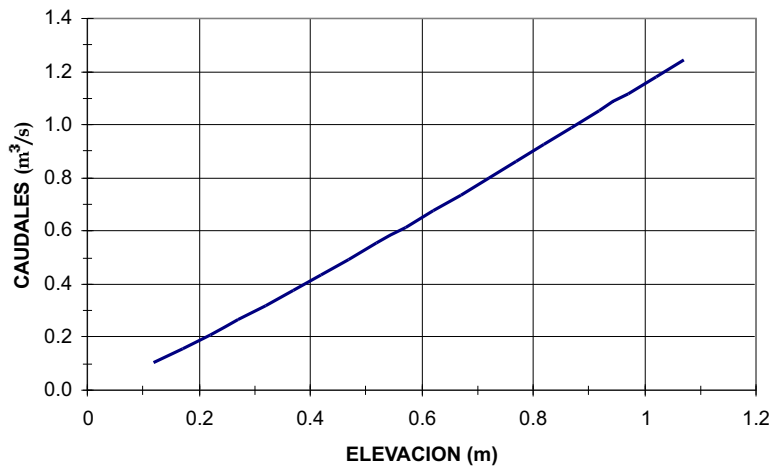
Elevación	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Elevación	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
0.12	0.112	0.62	0.680
0.17	0.163	0.67	0.741
0.22	0.216	0.72	0.803
0.27	0.270	0.77	0.865
0.32	0.326	0.82	0.928
0.37	0.383	0.87	0.992
0.42	0.441	0.92	1.056
0.47	0.500	0.97	1.120
0.52	0.559	1.02	1.185
0.57	0.619	1.07	1.250

**Tabla N° 4.1:** Caudales en Función de las Elevaciones, Halladas de la curva de Ajuste

#### 4.1.4 MEDICIÓN

La medición de gastos en el limnómetro se realiza de la siguiente manera:

- El operador toma la lectura de la profundidad del agua (en metros).
- Con la lectura del nivel del agua, se recurre a un gráfico de elevación -caudal (ver Figura N° 4.5), donde se convierte el nivel del agua a su equivalente de caudal.



**Figura N° 4.5:** Curva de Caudales Elevaciones en un Limnómetro

- El caudal también se obtiene de la siguiente manera: con el valor de la elevación del agua, se recurre a una tabla de elevación - caudal (ver Tabla N° 4.1) y allí encontramos el valor del caudal en función de la elevación del agua.

#### Ejemplo

Un limnómetro ubicado dentro de la sección de un canal, marca una elevación del agua igual a 0.57 m, se pide determinar el caudal que pasa por la sección.

#### Desarrollo

Con el nivel del agua igual a 0.57 m, se recurre a la curva elevaciones caudales de la Figura N° 4.5 y se lee  $Q = 0.619 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 4.2 MEDIDOR PARSHALL

### 4.2.1 INTRODUCCIÓN

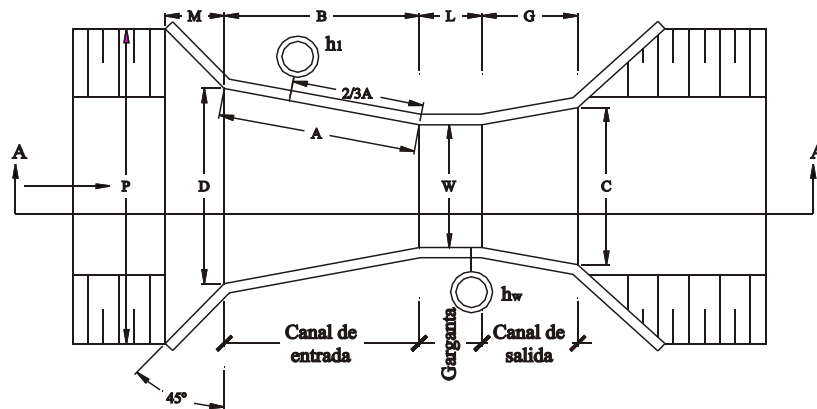
El medidor Parshall es uno de las estructuras más antiguas y usadas para la medición de caudales en canales abiertos; puede ser construido de madera, metal y de concreto, según la magnitud de los canales y caudales a medir.

El medidor Parshall posee una precisión muy buena, puede funcionar a flujo sumergido o a flujo libre y su operación es relativamente sencilla. Estos medidores abarcan un rango de medición que va desde 1 lps hasta  $85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

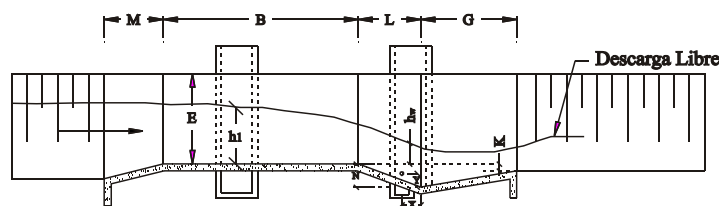
### 4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El medidor básicamente consta de tres partes, un canal de entrada, una garganta y un canal de salida, tal como se puede ver en la Figura N° 4.6.

- Canal de entrada**, es un canal con paredes verticales y simétricas; este canal converge a la garganta del aforador en una proporción de 5:1 y su plantilla de fondo es horizontal.
- Garganta**, es un canal con paredes verticales y paralelas, su plantilla de fondo posee una pendiente en la proporción de 2.67:1; al final de la garganta inicia el canal de salida.
- Canal de salida**, es un canal con paredes verticales y divergentes, el fondo de este canal posee una inclinación hacia arriba (contra pendiente). A la arista que se forma en la confluencia del fondo de la garganta con el fondo del canal de salida se le llama cresta y se denota por la letra W.



PLANTA



SECCIÓN A-A

Figura N° 4.6: Geometría de un Canal Aforador Parshall

La operación de este aforador es sencilla, de inspeccionar, de verificar si esta sufriendo degradación o si esta siendo operado incorrectamente.

El medidor Parshall se ubica sobre la sección del canal que se desea aforar, para su instalación se procede de la siguiente manera:

- a) La dirección del flujo en el canal, debe estar alineada al eje de la estructura. El flujo debe llegar de forma suave, libre de turbulencia y debe estar uniformemente distribuido a través de la sección del canal.
- b) El aforador se instala para operar en condiciones de flujo libre, y esto ocurre cuando la elevación de la superficie del agua a la salida de la garganta no es lo suficientemente alta como para generar remanso.
- c) En la mayoría de los casos el aforador esta fijado al piso, elevado respecto al nivel del fondo del canal, para prevenir sumergencia excesiva, dicho desnivel es igual al 70% de la sumergencia y a su vez representa la perdida de carga sobre la estructura.
- d) El aforador esta fijado tal que la elevación del agua en  $h_1$  es mayor al nivel normal de la superficie del agua a la salida del aforador, en una cantidad igual a la perdida de carga. La perdida de carga es igual a la diferencia entre  $h_1$  y  $0.7h_1$  ó también es igual a  $0.3h_1$ .

En la Tabla N° 4.2 se presenta las capacidades de descarga de los aforadores Parshall según su geometría y en la Tabla N° 4.3 se muestran sus características geométricas (ver también la Figura N° 4.6).

Ancho de la garganta W (mm)	Intervalo de descarga		Ecuación del gasto Q (m <sup>3</sup> /s), $h_1$ (m)	Intervalo de carga hidráulica		Grado de sumergencia S= $h_w/h_1$
	Q <sub>min</sub> (l/s)	Q <sub>max</sub> (l/s)		$h_1$ min (m)	$h_1$ max (m)	
76.2	0.77	32.1	$0.177h_1^{1.550}$	0.030	0.33	0.5
152.4	1.50	111.1	$0.381h_1^{1.580}$	0.030	0.45	0.6
228.8	2.50	251.0	$0.535h_1^{1.530}$	0.030	0.61	0.6
304.8	3.32	457.0	$0.691h_1^{1.520}$	0.030	0.76	0.7
457.2	4.80	695.0	$1.056h_1^{1.538}$	0.030	0.76	0.7
609.6	12.10	937.0	$1.428h_1^{1.550}$	0.046	0.76	0.7
914.4	17.60	1427.0	$2.184h_1^{1.566}$	0.046	0.76	0.7
1219.2	35.80	1923.0	$2.953h_1^{1.578}$	0.060	0.76	0.7
1524.0	44.10	2424.0	$3.732h_1^{1.587}$	0.076	0.76	0.7
1828.8	74.10	2929.0	$4.519h_1^{1.595}$	0.076	0.76	0.7
2133.6	85.80	3438.0	$5.312h_1^{1.601}$	0.076	0.76	0.7
2438.4	97.20	3949.0	$6.112h_1^{1.607}$	0.076	0.76	0.7

Tabla N° 4.2: Capacidades de Descarga para Aforadores Parshall (Ackers,1978)

**Tabla N° 4.3: Geometría de Aforadores Parshall, (Ackers,1978)**

W	A	B	C	D	E	L	G	K	M	N	P	X	Y
76.2	467	457	178	259	457	152	305	25	-	57	-	25	38
152.4	621	610	394	397	610	305	610	76	305	114	902	51	76
228.6	879	864	381	575	762	305	457	76	305	114	1080	51	76
304.8	1372	1343	610	845	914	610	914	76	381	229	1492	51	76
457.2	1448	1419	762	1026	914	610	914	76	381	229	1676	51	76
609.6	1524	1495	914	1206	914	610	914	76	381	229	1854	51	76
914.4	1676	1645	1219	1572	914	610	914	76	381	229	2222	51	76
1219.2	1829	1794	1524	1937	914	610	914	76	457	229	2711	51	76
1524.0	1981	1943	1829	2302	914	610	914	76	457	229	3080	51	76
1828.8	2134	2092	2134	2667	914	610	914	76	457	229	3442	51	76
2133.6	2286	2242	2438	3032	914	610	914	76	457	229	3810	51	76
2438.4	2438	2391	2743	3397	914	610	914	76	457	229	4172	51	76

**Nota:** Las unidades de medida de la Tabla N° 4.3 están en mm

Las ventajas del uso de aforadores Parshall radica en lo siguiente:

- a) Su forma no permite acumular sólidos en ninguna parte del aforador.
- b) El diseño hidráulico del aforador Parshall permite que el caudal sea una función lineal de la altura del tirante  $h_1$  a la entrada del dispositivo.
- c) El error de medición, cuando funciona como flujo libre es del 3%, y cuando funciona a flujo sumergido, el error de la medición es del 5%.

#### 4.2.3 CALIBRACIÓN ANALÍTICA

##### 4.2.3.1 FUNCIONAMIENTO COMO FLUJO LIBRE

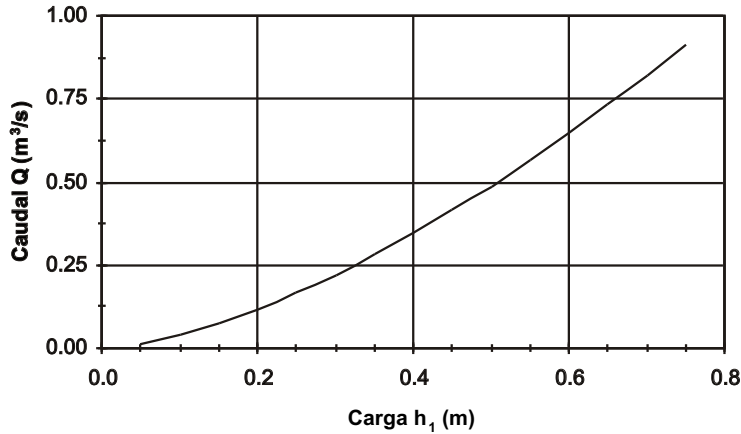
Cuando el aforador funciona a flujo libre, solo se requiere conocer el valor de  $h_1$  para obtener el caudal, siendo éste el caso, la calibración analítica para este tipo de aforadores se realiza según los siguientes pasos:

- a) Conociendo la dimensión de la garganta ( $W$ ), se recurre a la Tabla N° 4.2 para obtener la ecuación de descarga que gobierna al aforador; si la dimensión de la garganta ( $W$ ) no se encuentra en la tabla, se debe obtener la ecuación de descarga mediante interpolación.
- b) Obtenida la ecuación de descarga, se construye una tabla (ver Tabla N° 4.4), donde se halla el gasto en función de la carga  $h_1$ ; aquí hay que tener cuidado de no salir del rango de cargas y gastos especificados en la Tabla N° 4.2.

$h_1$	Q (m <sup>3</sup> /s)
0.05	0.01
0.10	0.04
0.20	0.12
0.30	0.22
0.40	0.35
0.50	0.49
0.60	0.65
0.65	0.73
0.70	0.82
0.75	0.91

**Tabla N° 4.4:** Relación de Carga  $h_1$  vs Caudales Q, para un Aforador Parshall con  $W = 0.6096$  m, con Ecuación de Descarga  $Q = 1.428 h_1^{1.55}$ .

- c) Los resultados de la Tabla N° 4.4, pueden ser expresados en un gráfico que representa una curva de carga  $h_1$  vs caudal  $Q$  (ver Figura N° 4.7).



**Figura N° 4.7:** Curva de Caudales  $Q$  vs Cargas  $h_1$ , para Aforador Parshall con  $W = 0.6096$  y Ecuación de Descarga  $Q = 1.428 h_1^{1.55}$

- d) En la Tabla N° 4.4 se tomo ( $0.046 \text{ m} < h_1 < 0.76 \text{ m}$ ), porque es el límite para las dimensiones del vertedor con  $W = 0.6096 \text{ m}$  (ver Tabla N° 4.2).

**43**

**4.2.3.2 FUNCIONANDO COMO FLUJO SUMERGIDO**

Cuando el aforador funciona sumergido, es decir cuando el grado de sumersión  $S$  de cada aforador es sobrepasado, es necesario hacer una corrección al gasto, para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = mxh_1^n - C \quad \dots(4-1)$$

Donde:

- $C$  : Corrección en función de  $W$ ,  $h_1$  y  $h_w$ .
- $m$  : Coeficiente de descarga (ver Tabla N° 4.5).
- $n$  : Exponente de descarga (ver Tabla N° 4.5).

W (m)	m	n	W (m)	m	n
0.15	0.3812	1.580	4.50	10.7900	1.600
0.30	0.6800	1.522	5.00	11.9370	1.600
0.50	1.1610	1.542	6.00	14.2290	1.600
0.75	1.7740	1.558	7.00	16.5220	1.600
1.00	2.4000	1.570	8.00	18.8150	1.600
1.25	3.0330	1.579	9.00	21.1070	1.600
1.50	3.6730	1.588	10.00	23.4000	1.600
1.75	4.3160	1.593	11.00	25.6920	1.600
2.00	4.9680	1.599	12.00	27.9850	1.600
2.50	6.2770	1.608	13.00	30.2780	1.600
3.00	7.3520	1.600	14.00	32.5700	1.600
3.50	8.4980	1.600	15.00	34.8630	1.600
4.00	9.6440	1.600			

**Tabla N° 4.5:** Valores de  $m$  y  $n$ , para la Ecuación (4-1), en Unidades Métricas

Los valores de C son obtenidos segun las siguientes ecuaciones

Función	Rango W (m)	Ecu. N°
$C = \frac{0.0285 h_i^{2.22}}{h_i^{3.05} / 3.05 S^{1.44}} \frac{h_i - 0.056}{87.94}$	0.15	(4-2)
$C = 0.0746((3.28h_i^{1.1} - 2.45))^{4.643h_i + 0.0939} W^{0.0001}$	0.3 - 2.5	(4-3)
$C = 0.671 S - 0.71 3.333 h_i^2 W$	2.5 - 15	(4-4)

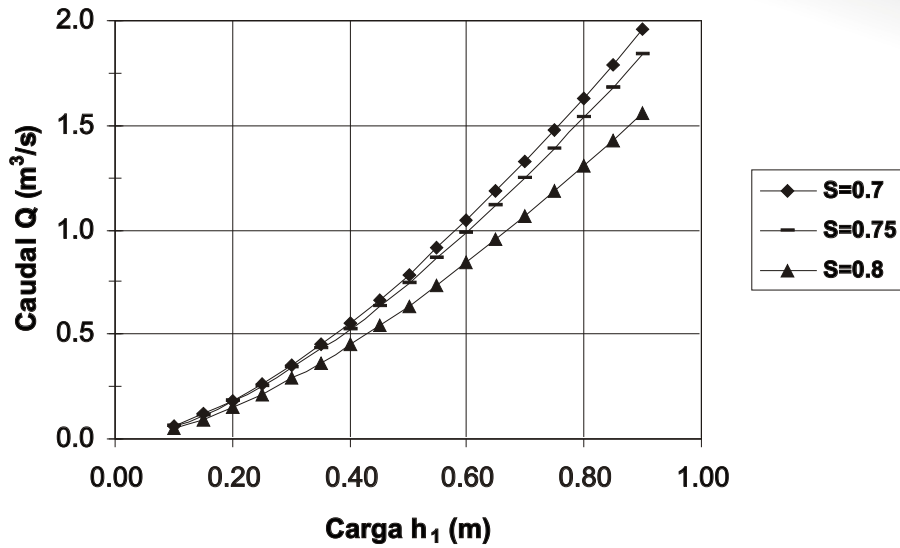
La calibración bajo la condición de flujo sumergido, requiere realizar mas cálculos que cuando el flujo es libre; a continuación se presentan los pasos a seguir para calibrar el aforador Parshall funcionando sumergido:

- El siguiente procedimiento es valido cuando el flujo es sumergido, es decir el grado de sumergencia S esta por encima del valor máximo especificado en la Tabla N° 4.2.
- Conociendo la dimensión de la garganta (W), se recurre a la Tabla N° 4.5, allí se obtienen los valores de m y n, que reemplazados en la ecuación (4-1) nos proporciona la ecuación de descarga del aforador.
- El valor de C, que se encuentra en la ecuación (4-1), se calcula empleando la ecuación (4-2, 4-3 ó 4-4), según el ancho W. Para hallar los caudales se construye una tabla (ver Tabla N° 4.6), donde el caudal Q es función de  $h_1$ , S y C.

Carga $h_1$ (m)	Sumerción					
	0.7		0.8		0.9	
	C (m³/s)	Q (m³/s)	C (m³/s)	Q (m³/s)	C (m³/s)	Q (m³/s)
0.10	0.0052	0.05936	0.0077	0.0569	0.0163	0.0483
0.20	0.0068	0.18495	0.0143	0.1775	0.0401	0.1517
0.30	0.0101	0.35243	0.0258	0.3367	0.0749	0.2876
0.40	0.0151	0.55429	0.0421	0.5273	0.1196	0.4498
0.50	0.0223	0.78601	0.0635	0.7449	0.1735	0.6348
0.60	0.0318	1.04446	0.0898	0.9864	0.2361	0.8401
0.70	0.0437	1.32726	0.1213	1.2496	0.3070	1.0639
0.80	0.0581	1.63255	0.1579	1.5328	0.3859	1.3048
0.85	0.0664	1.79314	0.1782	1.6813	0.4283	1.4313
0.90	0.0753	1.95879	0.1997	1.8344	0.4725	1.5616

**Tabla N° 4.6:** Relación de la Carga  $h_1$  vs el Caudal Q, para Aforadores Parshall que Funcionan Sumergidos con W = 1.0 m, S variable, m = 2.4, n = 1.57 y Ecuación de Descarga  $Q = 2.41 h_1^{1.57} C$

- En la Tabla N° 4.6 se encuentran tabulados los valores del caudal Q en función de  $h_1$  y cuando el flujo en el aforador es sumergido. En esta tabla se puede leer el caudal que pasa por el aforador cuando funciona sumergido, para W = 1.0 m y con S = 0.7, 0.8 ó 0.9.
- Los valores que se observan en la Tabla N° 4.6, pueden ser representados en forma gráfica (ver Figura N° 4.8).



**Figura N° 4.8:** Nomograma para Determinar el Caudal que pasa por un Aforador Parshall que Funciona Sumergido,  $W = 1.0$  m,  $S = 0.7, 0.8$  y  $0.9$ .

- f) Lo mas recomendable para la lectura de caudales, cuando el aforador funciona sumergido es empleando un monograma, los pasos de a) a e) especifican como se construyen y en la Figura N° 4.8 se presenta el nomograma solo para tres valores de sumergencia  $S$ , en realidad la calibración se debe de hacer para muchos valores de  $S$  con tal de cubrir un rango mas amplio de lecturas bajo condición sumergida.

#### 4.2.4 CALIBRACIÓN EN EL CAMPO

La calibración en campo se realiza de la siguiente manera:

- Se realiza el mantenimiento y la limpieza de la estructura, en especial sobre las reglas del aforador.
- Con la ayuda de un correntómetro se mide el caudal que pasa por el aforador, simultáneamente se toma la lectura sobre la regla graduada que se encuentra aguas arriba del aforador, con esto se logra una relación de la carga  $h_1$  con el caudal  $Q$ .
- Se realiza el paso b), tantas veces como varíe el caudal que pasa por el aforador, al final se construye una curva de elevaciones de carga  $h_1$  vs caudales  $Q$ .
- El paso c) se debe repetir un mínimo de tres veces; luego se deben dibujar las curvas de calibración sobre una misma escala grafica, y allí se debe dibujar una curva de ajuste que represente el promedio de las curvas de calibración. Lo anterior nos permite minimizar los errores de lectura en campo. En el desarrollo de la calibración de los limnímetros se detalla el procedimiento para la obtención de la curva de ajuste.
- La calibración del aforador Parshall que funciona sumergido es difícil, por lo que se recomienda que la calibración necesariamente debe de ser analítica.



#### 4.2.5 MEDICIÓN

La medición en los aforadores Parshall se da bajo dos condiciones, (a) cuando el flujo es libre y (b) cuando el flujo es sumergido; se recomienda que el aforador siempre funcione a flujo libre, sin embargo en caso trabaje sumergido la medición del caudal tiene buena aproximación, siempre y cuando el grado de sumergencia sea menor a 0.95; para valores mayores la medición del caudal se torna incierta.

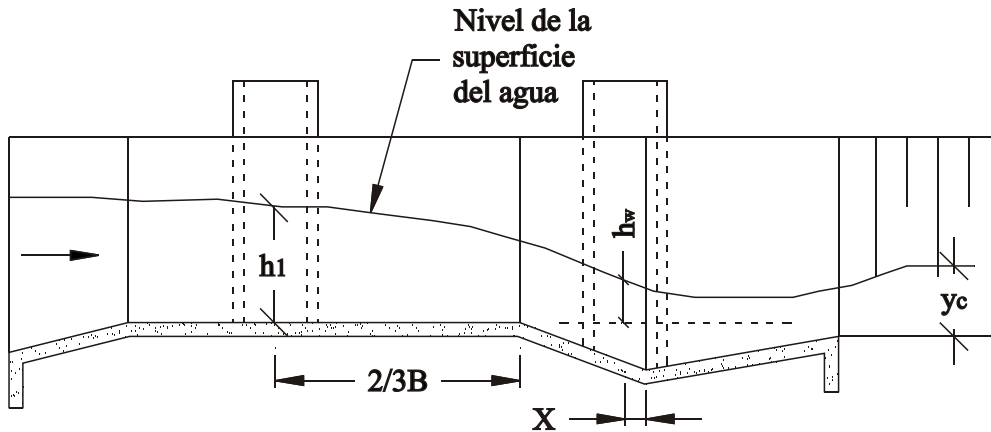


Figura N° 4.9: Perfil hidráulico del Aforador Parshall

En la Figura N° 4.9 se presenta el esquema del perfil hidráulico de los aforadores Parshall; donde  $h_1$  es el nivel del agua a la entrada del aforador y  $h_w$  es el nivel del agua a la salida de la cresta del aforador.

##### 4.2.5.1 MEDICIÓN EN CONDICIÓN DE FLUJO LIBRE

Para la medición en este caso se procede como sigue:

###### Analíticamente

- Se toma la lectura de la carga  $h_1$ ; conociendo la dimensión  $W$  se recurre a la Tabla N° 4.2 y se obtiene la ecuación de descarga para el aforador.
- Se reemplaza el valor de  $h_1$  sobre la ecuación obtenida en el paso anterior y se calcula el caudal  $Q$ .
- Ejemplo si se tiene un aforador  $W = 304.8$  mm y se mide una carga  $h_1 = 0.25$  m; de la Tabla N° 4.2 se tiene que la ecuación de descarga es:  $Q = 0.6909 h_1^{1.52}$ , reemplazando  $h_1$ , nos da  $Q = 0.084$  m<sup>3</sup>/s.

###### Gráficamente

- Para ello se tiene que contar con una curva de elevaciones - caudales, que previamente ha sido calibrado en función de la carga  $h_1$  (ver el acápite de calibración).
- Se toma la lectura de la carga  $h_1$ ; llevando la carga  $h_1$  al eje  $X$  de la curva elevaciones caudal, se intercepta la curva y se obtiene en  $Y$  el caudal que pasa por el aforador.

- c) Ejemplo: Para un aforador Parshall con  $W = 0.6096$  m, se lee una carga  $h_1 = 0.30$  m; para hallar el caudal se recurre a la Figura N° 4.7, entrando con  $h_1 = 0.30$  en el eje X, se intercepta la curva y proyectando en el eje Y se halla el caudal  $Q = 0.22$  m<sup>3</sup>/s.

### 4.3 AFORADOR SIN CUELLO

#### 4.3.1 INTRODUCCIÓN

Este tipo de aforadores son una forma simplificada de los aforadores Parshall, con la diferencia de que no poseen garganta y el fondo del aforador es horizontal, lo anterior permite que su construcción sea mas fácil comparada con los aforadores Parshall. Hay que considerar que las lecturas en los aforadores sin cuello no son muy sencillas, por lo que requiere de mucho cuidado en su operación y mantenimiento con el fin de asegurarse mediciones exactas.

Los aforadores sin cuello pueden ser contruidos de madera, metal o concreto, siendo su geometría relativamente sencilla es posible contar con aforadores portátiles, es decir transportables al campo para medir caudales en canales o para usarlos como instrumentos de calibración.

#### 4.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Esta estructura esta compuesta por tres elementos (ver Figura N° 4.10).

47

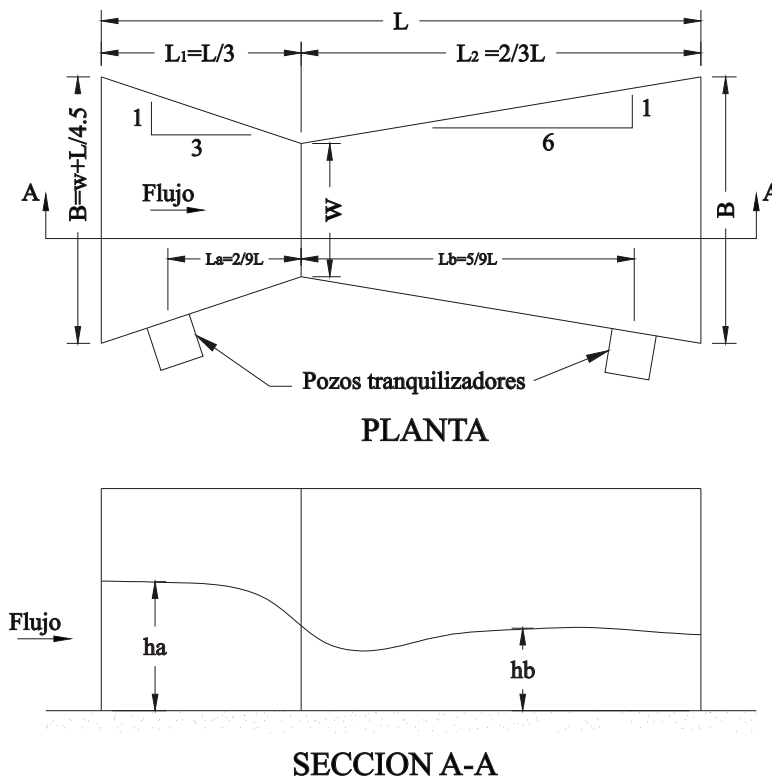


Figura N° 4.10: Geometría de los Aforadores sin Cuello

**Canal de entrada**

Esta constituida por un canal con paredes verticales, que converge horizontalmente en una proporción de 3:1 hacia una sección estrecha llamada garganta, que a su vez es el inicio del canal de salida.

**Garganta**

Es la sección contraída del aforador que se encuentra ubicada entre el canal de entrada y el canal de salida, se le denota por la variable  $w$ .

**Canal de salida**

Inicia en la sección de control (garganta) y se conecta con el canal aguas abajo mediante un canal divergente con paredes verticales a una proporción de 6:1.

**Fondo del aforador**

El nivel del fondo del aforador siempre es horizontal y permite definir si este funciona a descarga libre o a descarga sumergida.

Una característica de este aforador es que la sección de entrada coincide con la sección de salida y a ambas se le denota por la variable  $B$ . Normalmente el tamaño del aforador es especificado por las dimensiones de su garganta ( $w$ ) y su longitud ( $L$ ). Conociendo el valor de  $w$  y  $L$ , podemos obtener  $B$ , empleando la siguiente ecuación:

$$B = w \frac{L}{4.5} \quad \dots(4-5)$$

La misma ecuación puede ser expresada en términos de las longitudes de los canales de entrada y salida según la ecuación:

$$B = w \frac{2}{3} L_1 = w \frac{1}{3} L_2 \quad \dots(4-6)$$

Conociendo que:

$$L_1 = \frac{L}{3} \text{ y } L_2 = \frac{2}{3} L$$

Este aforador cuenta con dos reglas graduadas ubicadas dentro de sus respectivos pozos aquietadores de flujo, a una distancia  $L_a$  aguas arriba y a una distancia  $L_b$  aguas abajo, tal como se ve en la Figura N° 4.10. Los pozos permiten mitigar el efecto de las ondas y de la turbulencia que se genera dentro del canal, que impide que la lectura sea correcta. Cuando la precisión no es indispensable, se puede omitir tener los pozos y en su lugar colocar las reglas graduadas sobre las paredes laterales. Las ecuaciones para determinar  $L_a$  y  $L_b$  se escriben:

$$La = \frac{2}{9}L \quad \dots(4-8)$$

$$Lb = \frac{5}{9}L \quad \dots(4-9)$$

### 4.3.3 CALIBRACIÓN ANALÍTICA

La calibración en este tipo de estructuras se dan para los casos de flujo libre y flujo sumergido. Para determinar si el aforador sin cuello funciona como flujo libre o flujo sumergido es necesario comparar su grado de sumersión  $S$  con el grado de sumersión transitoria  $S_t$ . Cuando  $S < S_t$  se dice que el flujo es libre, caso contrario el flujo es sumergido. El grado de sumergencia  $S$  se calcula con la ecuación:

$$s = \frac{hb}{ha} \quad \dots(4-10)$$

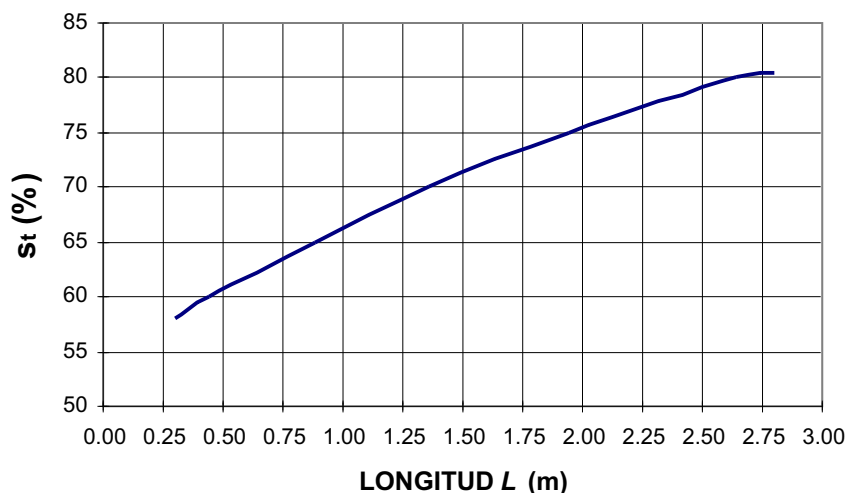
Por otro lado la sumergencia transitoria  $S_t$  se obtiene de la Figura N° 4.11 o al despejar  $S_t$  de la ecuación (4-11):

$$c \log st^{ns} = \frac{Cs}{c} 1 - st^n \quad \dots(4-11)$$

49

Donde:

- $S_t$  : Grado de sumergencia transitoria.
- $n$  : Exponente para descargas a flujo libre.
- $n_s$  : Exponente para descargas a flujo sumergido.
- $C$  : Coeficiente de descarga para flujo libre.
- $C_s$  : Coeficiente de descarga para flujo sumergido.



**Figura N° 4.11:** Relación entre el Grado de Sumergencia Transitoria ( $s_t$ ) y la Longitud ( $L$ ) del Aforador sin Cuello

**4.3.3.1 FUNCIONAMIENTO COMO FLUJO LIBRE**

En flujo libre el caudal es función directa de  $h_o$ , que se mide en la regla graduada ubicada aguas arriba del medidor. La ecuación (4-12) permite obtener el gasto que pasa por el medidor.

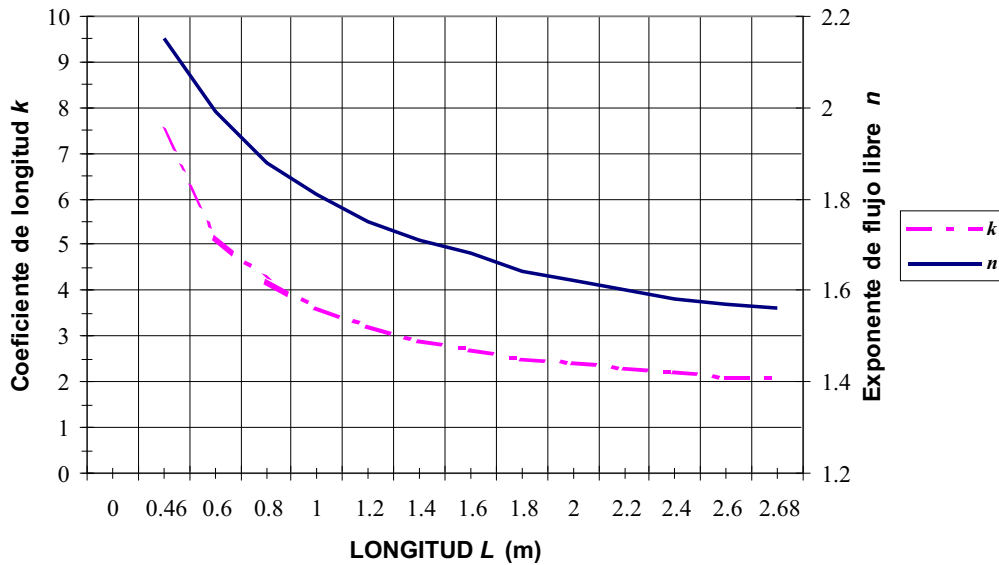
$$Q = c (ha)^n \quad \dots(4-12)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa por el aforador, (m<sup>3</sup>/s).
- $h_o$  : Profundidad del flujo aguas arriba, (m).
- $n$  : Exponente para descarga a flujo libre.
- $C$  : Coeficiente de descarga para flujo libre.

El valor de  $n$  se obtiene en función de la longitud  $L$  (ver Figura N° 4.12) y es constante para todos los aforadores sin cuello, sea cual sea la dimensión de la garganta  $W$ . Por otro lado el valor de  $C$  se obtiene de la ecuación (4-13), donde el coeficiente de longitud del aforador  $k$ , es función de la longitud  $L$  y del ancho de la garganta  $W$ . El valor del coeficiente  $k$  se obtiene de la Figura N° 4.12.

$$C = k(w)^{1.025} \quad \dots(4-13)$$



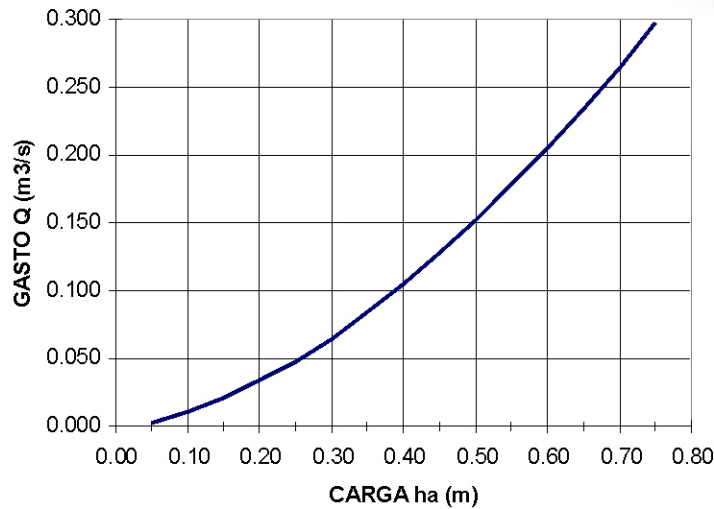
**Figura N° 4.12:** Relación entre el Coeficiente de Longitud para Flujo Libre ( $k$ ) y el Exponente de Flujo Libre ( $n$ ), con respecto a la longitud ( $L$ ), del Aforador sin Cuello

La calibración del aforador sin cuello a flujo libre, consiste en construir una tabla que nos permita obtener los gastos para diferentes mediciones de  $h_a$  en función de la geometría del aforador. Para construir la tabla se toman en cuenta los siguientes pasos.

- a) Una vez estabilizado el flujo se procede a determinar los valores de  $h_a$  y  $h_b$ , leídos directamente de las reglas ubicadas en el aforador.
- b) Empleando la ecuación (4-10), se calcula el grado de sumergencia  $S$ .
- c) De la Figura N° 4.11 o despejando  $S_t$  de la ecuación (4-11), se obtiene el valor del grado de sumergencia transitoria  $S_t$ ; luego se verifica que se cumpla la relación  $s < s_t$  para asegurar que el flujo es libre.
- d) De la Figura N° 4.12 se obtienen los valores de  $k$  y  $n$ , que están en función de la longitud  $L$ , y como ésta longitud no cambia, los valores de  $k$  y  $n$ , serán los mismos para todo valor de  $h_a$ , siempre y cuando se cumpla que  $s < s_t$ .
- e) Como  $k$  y  $n$  son constantes, el valor de  $C$  también lo será. El coeficiente  $C$  para flujo libre se calcula empleando la ecuación (4-13).
- f) Conociendo el valor de  $C$ , se obtiene el caudal  $Q$ , resultado de aplicar la ecuación (4-12).
- g) Conociendo los valores de  $C$  y  $n$ , se asume una serie de valores  $h_a$  y se construye una tabla de caudales  $Q$  vs elevaciones  $h_a$  (ver Tabla N° 4.7), del mismo modo se puede construir un gráfico de caudales  $Q$  vs elevaciones  $h_a$  (ver Figura N° 4.13).

$h_a$ (m)	Caudales (m <sup>3</sup> /s)	Caudales (lt/s)
0.05	0.003	3.00
0.10	0.011	11.00
0.15	0.021	21.00
0.20	0.034	34.00
0.25	0.048	48.00
0.30	0.065	65.00
0.35	0.084	84.00
0.40	0.105	105.00
0.45	0.128	128.00
0.50	0.152	152.00
0.55	0.178	178.00
0.60	0.205	205.00
0.65	0.234	234.00
0.70	0.265	265.00
0.75	0.297	297.00

**Tabla N° 4.7:** Tabla de Calibración de Caudales para el Vertedor sin cuello de Dimensiones  $w = 20$  cm y  $L = 180$  cm, que Funciona a Flujo Libre



**Figura N° 4.13:** Calibración de Curvas de Descarga para Aforador sin Cuello,  $w = 20$  cm y  $L = 180$  cm

En la Tabla N° 4.7 y la Figura N° 4.13, se presenta la calibración del aforador sin cuello, para la condición de flujo libre y las dimensiones del aforador que allí se indican. Siguiendo los pasos descritos arriba se pueden calibrar aforadores con diferentes geometrías. Los valores de  $h_a$  asumidos para esta calibración que se ven en la pudieron haber estado mas (o menos) espaciados, dependiendo de la necesidad que se tenga en el campo.

#### 4.3.3.2 FUNCIONANDO CON FLUJO SUMERGIDO

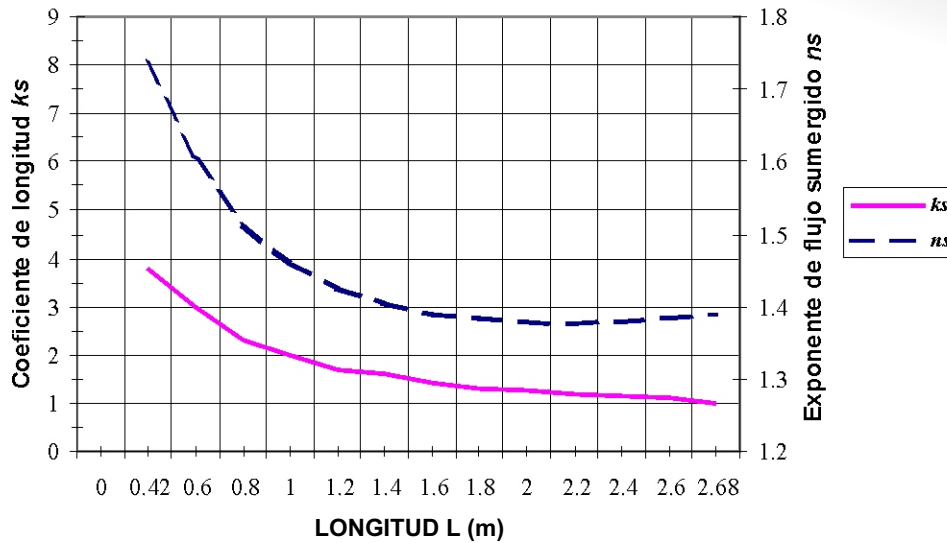
Cuando el aforador sin cuello opera en condiciones de flujo sumergido, se tiene que cumplir  $S > S_c$ . En este caso el caudal es función de la profundidad aguas arriba  $h_a$  y de la profundidad aguas abajo  $h_b$ . La ecuación del caudal bajo esta condición se escribe:

$$Q = C_s h_a h_b^{\frac{n}{\log S}} \quad \dots(4-14)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa por el aforador, (m<sup>3</sup>/s).
- $h_a$  : Profundidad del flujo aguas arriba, (m).
- $h_b$  : Profundidad del flujo aguas abajo, (m).
- $n$  : Exponente para descarga a flujo libre.
- $n_s$  : Exponente para descarga a flujo sumergido.
- $S$  : Grado de sumersión.
- $C_s$  : Coeficiente de descarga para flujo sumergido.

Los coeficientes  $n_s$  y  $k_s$  están en función de  $L$  y se obtienen de la Figura N° 4.14.



**Figura N° 4.14:** Relación entre el Coeficiente de Longitud para Flujo Sumergido  $k_s$  y el Exponente de Flujo Sumergido  $n_s$ , respecto a la Longitud  $L$ , del Aforador sin Cuello

El coeficiente de descarga  $C_s$  es función del coeficiente  $k_s$ , así como del ancho de la garganta  $W$ . La ecuación para obtener el coeficiente  $C_s$  se escribe:

$$C_s = k_s(w)^{1.025} \quad \dots(4-15)$$

**53**

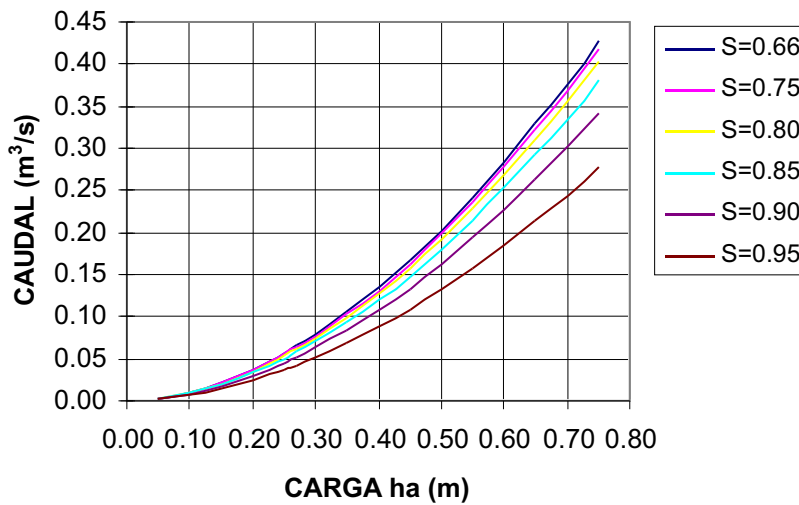
A continuación se detallan los pasos a seguir para calibrar un aforador sin cuello que funciona como flujo sumergido.

- Una vez estabilizado el flujo se procede a determinar los valores de  $h_a$  y  $h_b$  leídos directamente de las reglas ubicadas en el aforador.
- Empleando la ecuación (4-10) se calcula el grado de sumergencia  $S$ .
- De la Figura N° 4.11 o despejando  $S_t$  de la ecuación (4-11), se obtiene el grado de sumergencia transitoria  $S_t$ ; se debe verificar que se cumpla  $S > S_t$ , con lo anterior se asegura que el flujo que pasa por el aforador es sumergido.
- De la Figura N° 4.14 hallar  $k_s$  y  $n_s$ , y de la Figura N° 4.12 hallar el valor de  $n$ .
- Con los valores obtenidos en el paso anterior se calcular  $C_s$ , para ello se emplea la ecuación (4-15).
- Conociendo los valores de  $C_s$ ,  $h_a$ ,  $h_b$  y  $n$ , se reemplaza en la ecuación (4-14) y se determina el caudal.
- Asumiendo un valor de sumergencia  $S$  y conociendo los valores de  $C_s$ ,  $n_s$  y  $n$ , se construye una tabla de caudales  $Q$  vs la carga  $h_a$ , tal como se puede ver en la Figura N° 4.11. Así mismo, los valores de la Tabla N° 4.8 se pueden expresar en forma gráfica, mediante una curva de caudales  $Q$  vs carga  $h_a$ , tal como se ve en la Figura N° 4.15.



Carga $h_a$ (m)	Sumergencia $S$					
	0.66 $Q$ ( $m^3/s$ )	0.75 $Q$ ( $m^3/s$ )	0.8 $Q$ ( $m^3/s$ )	0.85 $Q$ ( $m^3/s$ )	0.9 $Q$ ( $m^3/s$ )	0.95 $Q$ ( $m^3/s$ )
0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.15	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
0.20	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
0.25	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
0.30	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05
0.35	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07
0.40	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09
0.45	0.17	0.16	0.16	0.15	0.13	0.11
0.50	0.20	0.20	0.19	0.18	0.16	0.13
0.55	0.24	0.24	0.23	0.21	0.19	0.16
0.60	0.28	0.28	0.27	0.25	0.23	0.18
0.65	0.33	0.32	0.31	0.29	0.26	0.21
0.70	0.38	0.37	0.36	0.33	0.30	0.24
0.75	0.43	0.42	0.40	0.38	0.34	0.28

Tabla N° 4.8: Calibración de Aforador sin Cuello, con Dimensiones  $w = 0.20$  m y  $L = 0.90$  m, con Grado de Sumergencia  $S = 0.66, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90$  y  $0.95$



- h) En la Figura N° 4.15, se obtiene una familia de curvas que relacionan al caudal  $Q$  con la carga  $h_a$ , donde cada curva esta dada para un determinado valor de la sumergencia  $S$ .
- i) En la Tabla N° 4.8 y en la Figura N° 4.15 se presenta la calibración del aforador sin cuello para las dimensiones indicadas; siguiendo los pasos descritos arriba, se pueden calibrar aforadores con diferentes geometrías. Los valores de  $h_a$  asumidos para la calibración (ver Tabla N° 4.8) pueden ser espaciados en intervalos menores o mayores, eso depende de las necesidades que se den en el campo.

#### **4.3.4 CALIBRACIÓN EN CAMPO**

La calibración en campo se realiza de la siguiente manera:

- a) Se realiza el mantenimiento y la limpieza de la estructura, en especial sobre las reglas del aforador.
- b) Con la ayuda de un correntómetro se halla el caudal que pasan por el aforador; simultáneamente se toma la lectura sobre la regla graduada que se encuentra aguas arriba del aforador, con esto se logra una relación de la carga  $h_a$  con el caudal  $Q$ .
- c) Se realiza el paso b), tantas veces como varíe el caudal que pasa por el aforador, al final se construye una curva de elevaciones de carga  $h_a$  vs caudales  $Q$ .
- d) Los pasos b) y c) se deben de realizar para dos condiciones; para cuando el aforador funciona como flujo libre y para cuando el aforador funciona como flujo sumergido; no hay que olvidar que las tablas y curvas de elevaciones - caudal son diferentes para cada condición.
- e) El paso c) se debe realizar al menos tres veces; luego se deben dibujar las curvas de calibración sobre una misma escala gráfica, y allí se debe dibujar una curva de ajuste que represente el promedio de las curvas de calibración. Lo anterior nos permite minimizar los errores de lectura en campo. En el desarrollo de la calibración de los limnómetros se detalla el procedimiento para la obtención de la curva de ajuste.
- f) La calibración del aforador sin cuello que funciona sumergido es tediosa y complicada, por lo que se recomienda, que la calibración bajo esa condición necesariamente debe ser analítica.

**55**

#### **4.3.5 MEDICION**

##### **4.3.5.1 MEDICION EN CONDICION DE FLUJO LIBRE**

###### **Analíticamente**

Determinar la descarga en un canal que posee un aforador sin cuello de dimensiones  $w = 20$  cm y  $L = 180$  cm (20x180 cm).

###### **Desarrollo**

- a) Una vez estabilizado el flujo se procede a determinar los valores de  $h_a$  y  $h_b$  leídos directamente de las reglas ubicadas en el aforador; para este ejemplo  $h_a = 0.25$  m y  $h_b = 0.10$  m.
- b) Calculamos el grado de sumergencia.

$$s = hb/ha*100 = 0.1/0.25*100 = 40\%$$

- c) De la Figura N° 4.11 o despejando ( $s_t$ ) de la ecuación (4-11), obtenemos el valor del grado de sumergencia transitoria ( $s_t$ ), que en nuestro caso es  $s_t = 63.7\%$ , como  $s < s_t$  asegura que el flujo por el aforador es a descarga libre.
- d) Calculamos el coeficiente de descarga a flujo libre  $c$ , para ello empleamos la ecuación (4-13); antes de la Figura N° 4.12 obtenemos los valores de  $k$  y  $n$ , que en nuestro caso resultan  $k=2.48$  y  $n=1.65$ .

$$c = k(w)^{1.025} = 2.48(0.2)^{1.65} = 0.477$$

- e) Conociendo el valor de  $c$ , obtenemos el valor del gasto aplicando la ecuación (15).

$$Q = c(h_a)^n = 0.477(0.25)^{1.65} = 0.487 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Gráficamente**

- a) Se tiene que contar con una curva de elevaciones - caudales, que previamente ha sido calibrado en función de la carga  $h_o$  (ver el acápite de calibración).
- b) Se toma la lectura de la carga  $h_o$ ; llevando la carga  $h_o$  al eje X de la curva elevaciones - caudal, se intercepta la curva y se obtiene en Y el caudal que pasa por el aforador.
- c) Ejemplo: Para un aforador sin cuello con  $W = 0.20$  m,  $L = 1.80$  m y con una carga  $h_o = 0.30$  m; el caudal se halla recurriendo a la Figura N° 4.13, entrando con  $h_o = 0.30$  m en el eje X, se intercepta la curva y proyectando en el eje Y se halla el caudal  $Q = 0.065$  m<sup>3</sup>/s.

**4.3.5.2 MEDICIÓN EN CONDICIONES DE FLUJO SUMERGIDO**

**Analíticamente**

Determinar la descarga en un canal que posee un aforador sin cuello de dimensiones  $w = 20$  cm y  $L = 90$  cm (20x90 cm).

**Desarrollo**

- a) Una vez estabilizado el flujo se procede a determinar los valores de  $h_o$  y  $h_b$  leídos directamente de las reglas ubicadas en el aforador; para este ejemplo  $h_o = 0.27$  m y  $h_b = 0.22$  m.

- b) Calculamos el grado de sumergencia.

$$s = hb/ha*100 = 0.22/0.27*100 = 81.5\%$$

- c) De la Figura N° 4.11 o despejando ( $s_t$ ) de la ecuación (4-11), obtenemos el valor del grado de sumergencia transitoria ( $s_t$ ), que en nuestro caso es  $s_t = 65\%$ , como  $s > s_t$  asegura que el flujo que pasa por el aforador es sumergido.

- d) Para emplear la ecuación de descarga (4-14), se requiere conocer  $c_s$ ,  $n_s$  y  $n$ . Así en la Figura N° 4.12 se obtiene  $n = 1.84$  y de la Figura N° 4.14 se tiene que  $k_s = 2.18$  y  $n_s = 1.48$ . Entonces:

$$cs = ks(w)^{1.025} = 2.18(0.2)^{1.025} = 0.418$$

- e) Conociendo el valor de  $c_s$ , obtenemos el valor del caudal aplicando la ecuación (4-14).

$$Q = 0.418(0.05)^{1.84} / (\text{colog } 81.5)^{1.84} = 0.0604 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Gráficamente**

Ejemplo: Para un aforador sin cuello con  $W = 0.20$  m,  $L = 0.90$  m,  $S = 0.75$  y con una carga  $h_o = 0.40$  m; el caudal se halla recurriendo a la Figura N° 4.15  $Q = 0.13$  m<sup>3</sup>/s, se obtiene el mismo caudal si recurrimos a la Tabla N° 4.8.

**4.4 VERTEDEROS DE CRESTA ANCHA (RBC)**

**4.4.1 INTRODUCCIÓN**

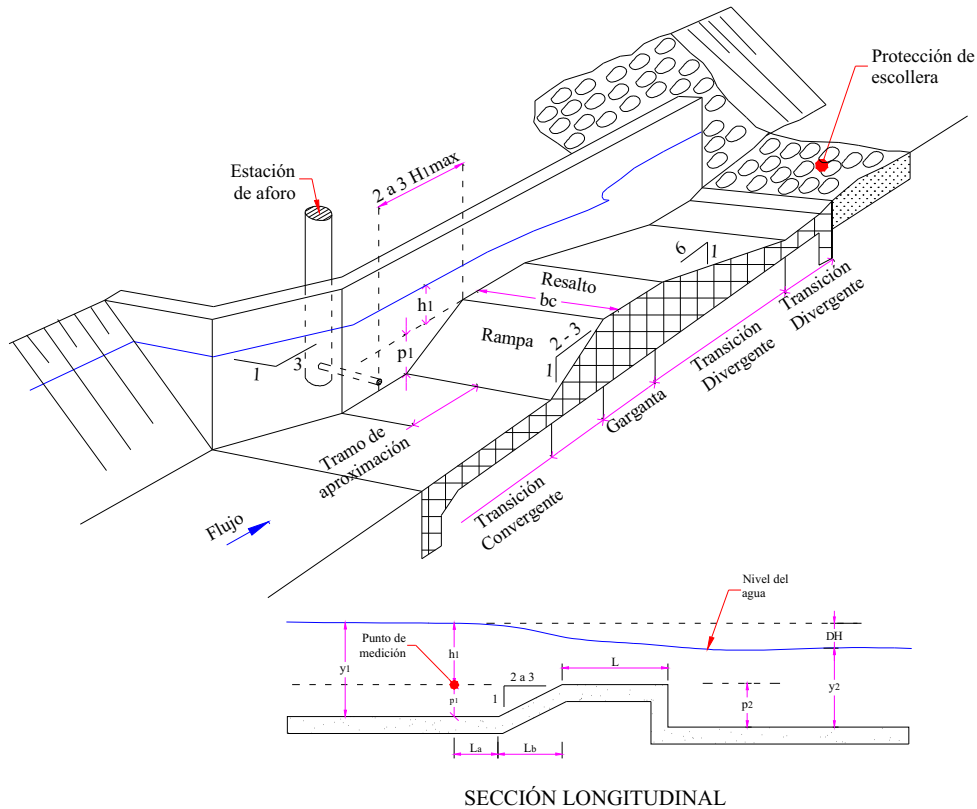
Los vertederos de cresta ancha son estructuras de aforo que se ubican sobre la sección del canal, ya sea rectangular o trapezoidal. Uno de los tipos más populares de estas estructuras son los llamados aforadores RBC, por las iniciales de sus autores (Replogle, Bos y Clemens). Esta estructura tiene la ventaja que puede ser usada en secciones revestidas y no revestidas. La estructura no permite regular el flujo, pero sí es capaz de medir un amplio rango de descargas.

Para medir el gasto que pasa por el aforador RBC, sólo se requiere conocer la medida de la profundidad del agua, aguas arriba del aforador, ya que existe una relación muy estrecha entre la profundidad del agua y el gasto que pasa por el aforador.

Los costos de construcción de esta estructura son bajos y pueden construirse de concreto o metal, este ultimo cuando el aforador es portátil.

**4.4.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

Cuando el aforador se encuentra en canales de tierra está compuesta de las siguientes partes: entrada al canal de aproximación, canal de aproximación, tramo convergente, garganta, tramo divergente, poza amortiguadora y protección de escollera, tal como se ve en la Figura N° 4.16.



**Figura N° 4.16: Sección Típica y Perfil de un Aforador de Cresta Ancha (RBC) y sus Dimensiones**

A continuación se describen, cada una de los componentes del aforador RBC:

- a) **Canal de aproximación**, tiene como finalidad, proporcionar una sección transversal y una velocidad de aproximación conocida. En la mayoría de los casos esta sección es rectangular al igual que la sección de la garganta, pero cuando la sección es trapezoidal, el gasto Q debe de corregirse por efectos de la velocidad de llegada siendo para el caso rectangular es despreciable.
- b) **Transición convergente**, En esta zona se encuentra una rampa en proporción de 1:2 3, dicha rampa permite la sobre elevación del flujo para generar la descarga en forma de vertedero.
- c) **Garganta**, es la zona que funciona como vertedero de cresta ancha; esto permite que las líneas de corriente permanezcan rectas y paralelas.
- d) **Transición divergente**, es la zona de salida del vertedero de cresta ancha, posee una forma de rampa con el fin de que el flujo salga con menos energía que si fuera una caída. en muchos casos se opta por prescindir de la zona de transición divergente y del canal de cola
- e) **Canal de cola**, es la parte de la estructura que sirve de transición entre el aforador y el canal aguas abajo.

#### 4.4.3 CALIBRACIÓN ANALÍTICA

Para calibrar el aforador RBC, se debe considerar que siempre debe de funcionar bajo la condición de flujo libre. En la Figura N° 4.16 se muestra las dimensiones características del perfil del aforador RBC.

La distancia de la garganta  $L$ , debe de ser aproximadamente igual a 1.5 veces la carga máxima  $h_1$ , pero en cualquier otro caso se debe cumplir la relación,  $0.1h_1/L1.0$ , con lo anterior se garantiza una condición estable del coeficiente de descarga  $C_d$ .

La distancia  $L_b$  es aproximadamente igual a 2 veces  $p_1$ , y la distancia  $L_a$  debe de ser mayor a  $h_{1max}$ . La distancia  $p_1$  se obtiene de la ecuación:

$$p_1 = y_1 - h_1$$

Donde:

$y_1$  : Tirante de agua en el canal, (m).

$h_1$  : Carga sobre el vertedero, (m).

El coeficiente de descarga  $C_d$  se obtiene de la Figura N° 4.17, y es función de la relación  $h_1/L$ . El coeficiente  $C_d$  también se puede obtener de la ecuación:

$$C_d = \frac{h_1}{L} 0.07^{0.018} \quad \dots(4-16)$$

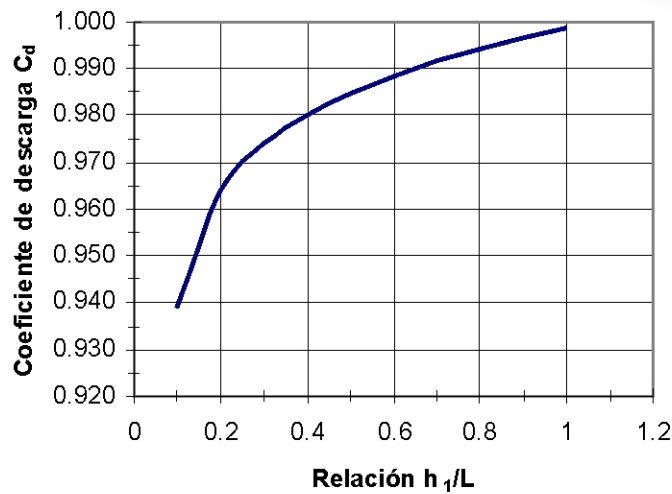


Figura N° 4.17: Valor de  $C_d$  en Función de  $h_1/L$

La ecuación de descarga para los aforadores RBC, se escribe:

$$Q = C_d \times C_v \times 2/3 \times (2/3g)^{0.5} b_c \times h_1^{1.5} \quad \dots(4-17)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa por el aforador RBC, ( $m^3/s$ )
- $C_d$  : Coeficiente de descarga.
- $C_v$  : Coeficiente de velocidad de aproximación.
- $b_c$  : Ancho de la cresta vertedera, (m).
- $h_1$  : Carga sobre la cresta, (m).

59

El coeficiente  $C_v$ , corrige el error de desprestigiar la carga de velocidad de la sección de aforo. El coeficiente  $C_v$  se obtiene de la siguiente ecuación:

$$C_v = 1 - \frac{V_1^2}{2gh_1} \quad \dots(4-18)$$

Donde:

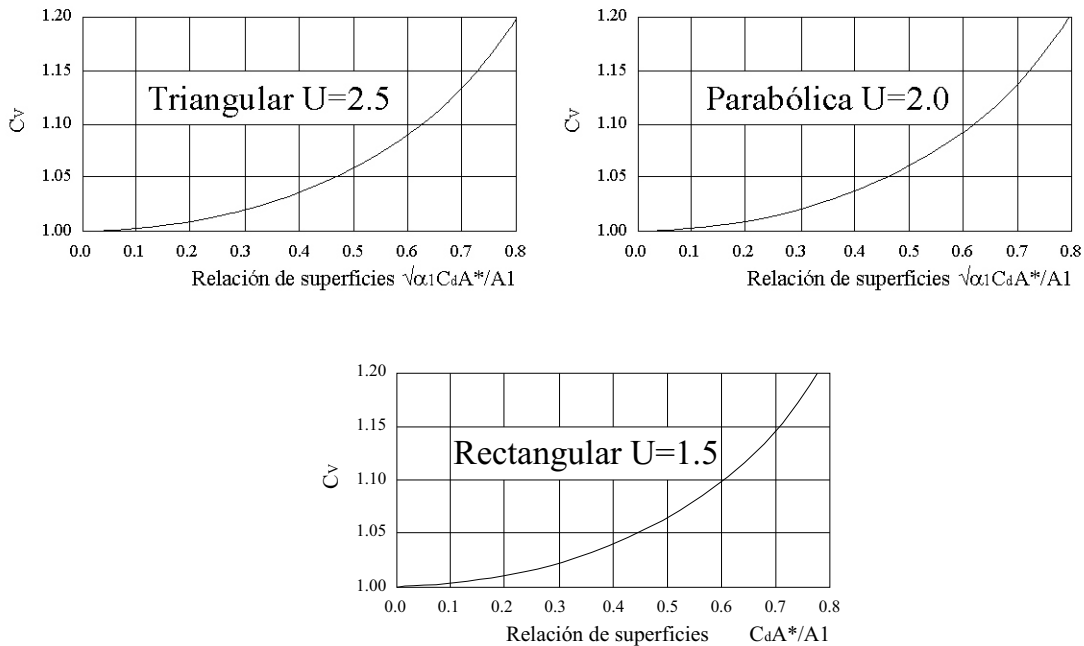
- $a_1$  : Coeficiente de carga de velocidad,  $a_1=1.04$ .
- $V_1$  : Velocidad en el canal, (m/s).
- $u$  : Exponente de  $h_1$  en la ecuación de gasto.

Como es casi imposible conocer a priori el valor de la velocidad en el canal, el coeficiente  $C_v$  puede ser obtenido de la Figura N° 4.18. El valor del coeficiente  $u$ , varia en función del tipo de la sección del vertedero, y se obtiene de la tabla siguiente. En la relación  $(a_1)^{0.5} C_d A^*/A_1$ ,  $A^*$  es el área hidráulica en la sección de la garganta y  $A_1$  es el área hidráulica en el canal de llegada; para una sección rectangular se tiene:

$$A^* = b_c \times h_1$$

$$A_1 = b_1 \times y_1$$

Tipo de sección	Coefficiente u
Rectangular	1.5
Triangular	2.5
Parabólica	2.0



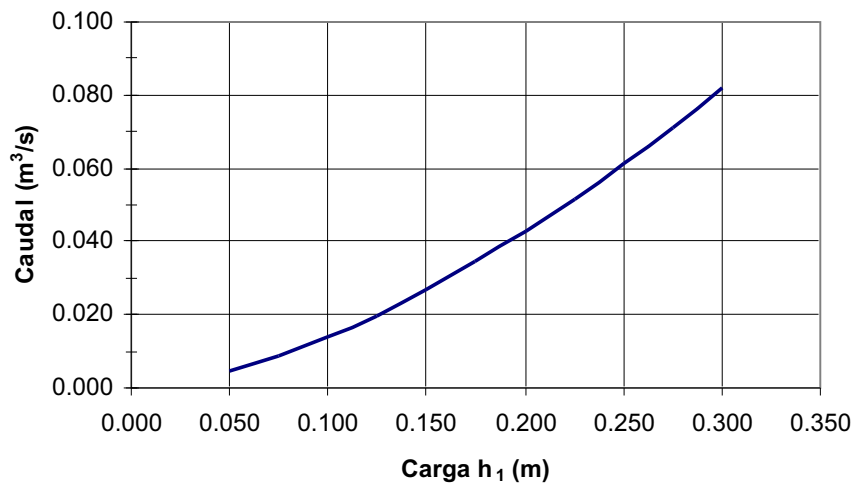
**Figura N° 4.18:** Valores de  $C_v$  en Función de la Relación  $(\alpha_1)^{0.5} C_d A^* / A_1$

Para calibrar el aforador RBC, se siguen los siguientes pasos:

- Conociendo la longitud de la garganta  $L$ , y obteniendo el valor de  $h_1$  de la lectura en la regla del aforador, se calcula la relación  $h_1/L$ .
- Con la relación  $h_1/L$ , se determina el valor del coeficiente de descarga  $C_d$ , para ello se emplea la ecuación (4-16) o se puede leer directamente de la Figura N° 4.17.
- De la ecuación (4-18) se calcula el valor del coeficiente de corrección por velocidad  $C_v$ ; Para ello es necesario conocer la velocidad en el canal de llegada, cuando no se conoce la velocidad del canal, el coeficiente  $C_v$  se obtiene de la Figura N° 4.18; el coeficiente  $u$  es función de la forma de la sección y sus valores son obtenidos de la tabla correspondiente.
- Como ya se conoce el valor de  $C_d$ ,  $C_v$ ,  $bc$  y  $h_1$ , se determina el caudal empleando la ecuación (4-17).
- En los pasos anteriores se ha obtenido el caudal que pasa por el aforador RBC en función de su carga  $h_1$ , del mismo modo se puede determinar el gasto para diferentes valores de  $h_1$  asumidos (ver Tabla N° 4.9).

$h_1$ (m)	$y_1$ (m)	$h_1/L$	$C_d$	$(h_1)^{0.5} C_d A^*/A_1$	$C_v$	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
0.050	0.150	0.125	0.949	0.32	1.03	0.005
0.075	0.175	0.1875	0.962	0.42	1.04	0.009
0.100	0.200	0.25	0.970	0.49	1.06	0.014
0.125	0.225	0.3125	0.975	0.55	1.075	0.020
0.150	0.250	0.375	0.979	0.60	1.1	0.027
0.175	0.275	0.4375	0.982	0.64	1.13	0.035
0.200	0.300	0.5	0.985	0.67	1.14	0.043
0.225	0.325	0.5625	0.987	0.70	1.15	0.052
0.250	0.350	0.625	0.989	0.72	1.16	0.061
0.275	0.375	0.6875	0.991	0.74	1.17	0.071
0.300	0.400	0.75	0.993	0.76	1.18	0.082

**Tabla N° 4.9:** Cálculo de los Caudales  $Q$  en Función de la Carga  $h_1$ , para un aforador RBC con  $L = 0.4$  m,  $b_c = 0.25$  m,  $y_1 = 0.1$  m; con Canal Rectangular de Llegada con  $b_1 = 0.25$  m



**Figura N° 4.19:** Curva de Cargas  $h_1$  vs Gastos  $Q$ , para un Aforador RBC con  $L = 0.4$  m,  $b_c = 0.25$  m,  $y_1 = 0.1$  m; con Canal Rectangular de Llegada con  $b_1 = 0.25$  m.

#### 4.4.4 CALIBRACIÓN EN CAMPO

La calibración en campo de los aforadores RBC, se realizan teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realiza el mantenimiento y la limpieza de la estructura, en especial sobre las reglas del aforador.
- Con la ayuda de un correntómetro se halla el caudal que pasa por el aforador RBC, simultáneamente sobre la regla graduada que se encuentra aguas arriba del aforador, se toma la lectura de la carga  $h_1$ , con esto se logra una relación de la carga  $h_1$  con el caudal  $Q$ .
- Se realiza el paso b), tantas veces como varíe el caudal que pasa por el aforador RBC; con todos los datos de las mediciones se construye una curva elevaciones de carga  $h_1$  vs caudales  $Q$ .



- d) El paso c) se debe realizar al menos tres veces; luego se deben dibujar las curvas de calibración sobre una misma escala gráfica, y allí se debe dibujar una curva de ajuste que represente el promedio de las curvas de calibración. Lo anterior nos permite minimizar los errores de lectura en campo.

#### **4.4.5 MEDICIÓN**

La medición en este tipo de estructuras es muy simple, solo se requiere conocer el valor de la carga  $h_1$ , el cual se obtiene de leer el nivel del agua sobre la regla graduada aguas arriba del vertedero.

A continuación se detalla mediante un ejemplo la forma de calcular el caudal en un aforador RBC.

##### **Ejemplo**

Se tiene un aforador RBC con las siguientes características,  $L=0.4$  m,  $b_c=0.25$  m,  $p_1=0.1$  m; con canal rectangular de llegada con  $b_1=0.25$ m.

Desarrollo

- a) Si suponemos que sobre la regla del aforador se lee una carga  $h_1 = 0.125$ m.  
b) El caudal se obtiene a partir de la curva calibrada del aforador en mención, la que se muestra en la Figura N° 4.19; allí entrando en el eje de las cargas  $h_1$  con el valor de 0.125, se intercepta la curva y su proyección sobre el eje nos da un caudal  $Q = 0.02$  m<sup>3</sup>/s.  
c) El caudal obtenido en el paso b), también se puede calcular al recurrir a la Tabla N° 4.9.

#### **4.5 VERTEDEROS**

##### **4.5.1 INTRODUCCIÓN**

Los vertederos son estructuras muy usadas para la medición de caudales en canales abiertos, debido a que es fácil de construir y operar. Este tipo de estructuras se clasifican en tres tipos, según su sección vertedera, y son: rectangulares, trapezoidales y triangulares. El material de construcción puede ser madera, metal o concreto; mas adelante se especifican los detalles y requerimientos para cada clase de vertedero.

Los vertederos pueden ser ubicados en canales de tierra o revestidos, que cumplan con las condiciones de: (a) que el tramo del canal donde se encuentra el vertedero sea recto, y (b) que la sección transversal del canal tenga un bordo libre lo suficientemente grande para evitar derrames por el efecto de remanso que produce el vertedero.

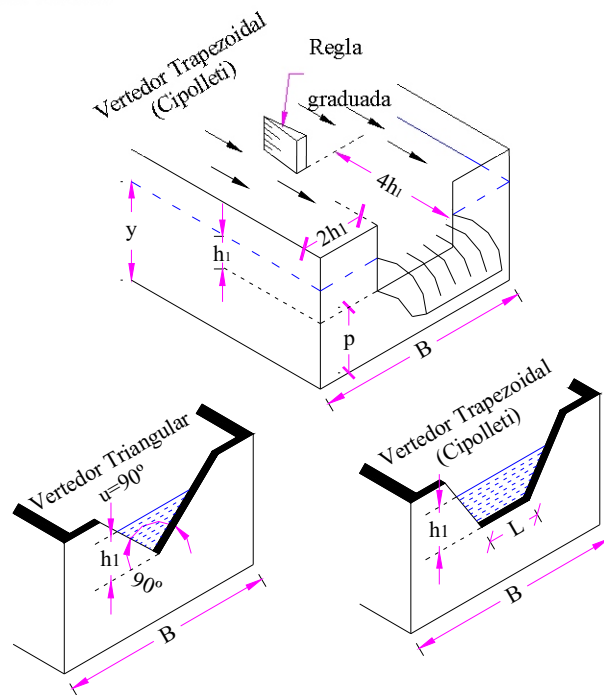
##### **4.5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA**

Un vertedero es una estructura que esta dispuesta de forma perpendicular a la dirección del flujo en el canal, permite pasar el agua sobre una sección debidamente diseñada para medir el caudal y consta de las siguientes partes (ver Figura N° 4.20):

**Canal de llegada**, puede tener la misma geometría del canal alimentador o una sección mas amplia con el fin de disminuir la velocidad de llegada del flujo.

**Sección vertedera**, puede ser rectangular, trapezoidal o triangular; se ubica a cierta altura del fondo del canal y su ancho puede ocupar toda la sección del canal o puede ser reducida a una sección menor.

**Canal de salida**, puede tener una zona de transición si el ancho del canal fue modificado a la entrada del vertedero o en caso contrario continuar con la misma geometría del canal.



**Figura N° 4.20:** Esquema de los Vertederos

La operación de este tipo de estructuras es sencilla, por lo que es fácil inspeccionar y verificar si esta sufriendo degradación o si esta siendo operado incorrectamente. La lectura se hace en una regla graduada, donde el cero de la regla coincide con el nivel de la cresta vertedera, lo anterior indica que se mide la carga sobre el vertedero. A cada lectura de carga le corresponde un caudal, que se obtiene de una curva elevaciones - caudales, una tabla de elevaciones -caudales o una ecuación de descarga, que ha sido calibrada previamente.

#### 4.5.2.1 TERMINOS EMPLEADOS EN LA OPERACIÓN DE VERTEDEROS

##### Velocidad de aproximación

Se obtiene al dividir el caudal entre el área de la sección del flujo. La velocidad de aproximación puede alterar la descarga sobre los vertederos, al reducir o aumentar la longitud efectiva de la cresta o al influir en la medición de la carga.

### **Flujo libre**

Ocurre cuando la descarga sobre el vertedero, deja un vacío entre el chorro y el vertedero, permitiendo el acceso del aire detrás del chorro; bajo estas condiciones la descarga no se ahoga.

### **Flujo sumergido**

Se le llama así cuando el nivel de la superficie del agua a la salida del vertedero se encuentra sobre el nivel de la cresta vertedera, en estas condiciones la medición del flujo no es exacta, por lo que no se recomienda tomar mediciones, a menos que, se emplee algún método de corrección para descarga sumergida o calibrar la estructura para el funcionamiento sumergido.

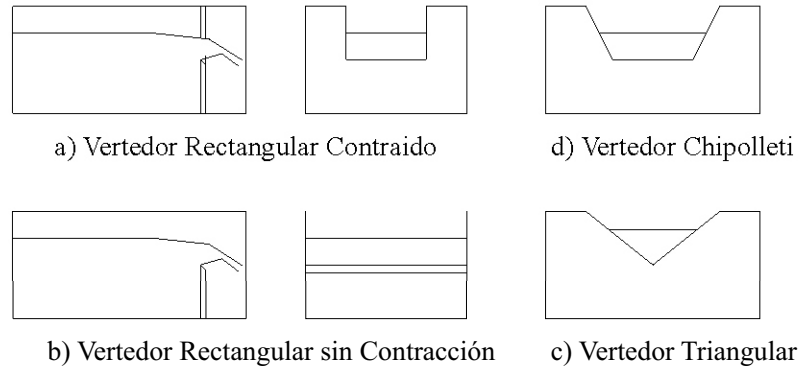
#### **4.5.2.2 CONDICIONES NECESARIAS PARA LOS VERTEDEROS DE PARED DELGADA**

Existen requerimientos comunes a todos los vertederos de pared delgada, los cuales son necesarios para obtener una medición exacta; a continuación se presenta las recomendaciones mas relevantes:

- Aguas arriba del vertedero, las paredes del canal y del mismo vertedero deben de estar aplomadas y lisas.
- La sección vertedera debe de estar ubicada de forma perpendicular al eje del canal.
- Para vertederos rectangulares y trapezoidales, el fondo de la cresta vertedera debe estar nivelada, y en vertederos triangulares los ángulos deben de estar bien definidos y debidamente aplomados.
- Todo el filo vertedero debe tener el mismo espesor. Si el espesor del vertedero rectangular y trapezoidal es muy grueso se le debe de reducir colocando un bisel de 45° en la cresta y las paredes, para vertederos triangulares se recomienda un bisel de 60°. Los biseles permiten despegar el flujo de las paredes del vertedero, de no hacerlo se produciría cavitación.
- El chorro de descarga debe tocar únicamente la cara y los lados del vertedero aguas arriba de la cresta.
- El máximo nivel de la superficie del agua a la salida del vertedero debe de ser menor a 0.06 m por debajo del nivel de la cresta. También es necesario verificar constantemente que debajo del chorro siempre exista aire para disminuir el riesgo de cavitación.
- Para prevenir que el chorro se pegue al vertedero, la carga por encima del vertedero debe ser mayor a 0.06 m.
- Para medir la carga sobre el vertedero se coloca una regla graduada aguas arriba del vertedero, a una distancia no menor de cuatro veces el valor máximo de la carga que se produce en la cresta.
- Para facilitar la lectura de las cargas, se hace coincidir el cero de la regla con el nivel de la cresta vertedera.
- Cuidar que la zona próxima al vertedero este libre de depósitos de sedimentos.

**4.5.3 CLASIFICADOS DE LOS VERTEDEROS**

Comúnmente los vertederos se clasifican según la forma de su sección de vertido, es así que existen vertederos rectangulares, trapezoidales (Cipolleti) y triangulares, (ver Figura N° 4.21).



**Figura N° 4.21: Esquemas de Diferentes Tipos de Vertederos**

En cualquiera tipo de vertedero, la sección de vertido lo constituye el área que se encuentra delimitada por el perímetro mojado de la sección.

**65**

**4.5.4 VERTEDEROS RECTANGULARES PARCIAL Y TOTALMENTE CONTRAIDOS**

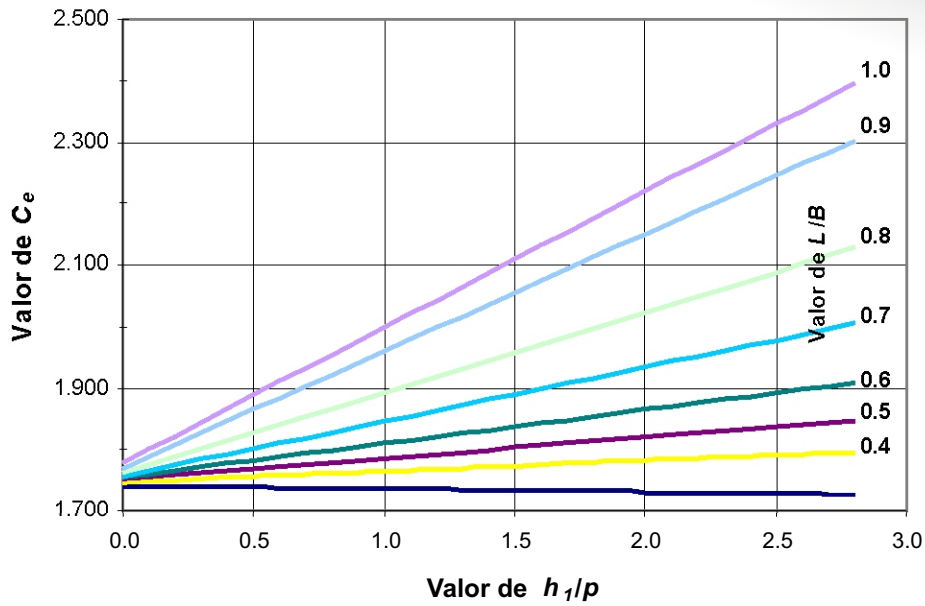
Un esquema del vertedero con contracciones se observa en la Figura N° 4.21 a). En este tipo de vertederos el coeficiente de descarga  $C_e$  es función de la carga  $h_1$ , la longitud del vertedero  $L$  y la sección del canal de aproximación  $B$ . La ecuación de descarga para este tipo de vertedero se escribe:

$$Q = C_e L h_1^{3/2} \quad \dots(4-19)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa por el vertedero, (m<sup>3</sup>/s).
- $C_e$  : Coeficiente efectivo de descarga, (m<sup>1/2</sup>/s).
- $L$  : Longitud total de la cresta vertedera, (m).
- $h_1$  : Medición de la carga sobre la cresta vertedera, (m).
- $B$  : Ancho medio del canal de aproximación, (m).

El coeficiente de descarga  $C_e$  incluye efectos de la profundidad  $p$  y del ancho del canal de aproximación  $B$ , donde se encontró que  $C_e$  es función de  $h_1/p$  y  $L/B$ ; los valores de  $C_e$  se obtienen de la Figura N° 4.22.



**Figura N° 4.22:** Coeficiente de Descarga  $C_e$ , como Función de  $L/B$  y  $h_1/p$ , Proporcionado por el Georgia Institute of Technology

La ecuación para las rectas de la Figura N° 4.22 se obtienen de:

$$C_e = C_1 \frac{h_1}{p} + C_2 \quad \dots(4-20)$$

Donde:

- $C_e$  : Coeficiente de descarga efectiva.
- $C_1$  : Coeficiente en función de  $L/B$ , ver Tabla N° 4.10.
- $h_1$  : Carga sobre el vertedero, (m).
- $p$  : Altura del fondo del canal de aproximación a la cresta (m).
- $C_2$  : Coeficiente en función de  $L/B$ , ver Tabla N° 4.10.

$L/B$	$C_1$	$C_2$
0.2	-0.0087	3.152
0.4	0.0317	3.164
0.5	0.0612	3.173
0.6	0.0995	3.178
0.7	0.1602	3.182
0.8	0.2376	3.189
0.9	0.3447	3.205
1	0.4	3.22

**Tabla N° 4.10:** Coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ , según Kindsvater-Cater

**Limites de uso**

- La longitud de la cresta  $L$ , no debe de ser menor a 0.15 m.
- La altura de la cresta  $p$ , no debe de ser menor a 0.10 m.
- La carga  $h_1$ , no debe ser menor a 0.06 m.
- El valor de  $h_1/p$  deben ser menor a 2.4.
- Aguas abajo del vertedero, el nivel del agua debe ser no menos de 0.05 m, por debajo del nivel de la cresta.

**4.5.4.1 CALIBRACIÓN ANALÍTICA**

Cualquier vertedero rectangular puede ser calibrado analíticamente empleando las ecuaciones (4-19) y (4-20), siempre y cuando las dimensiones del vertedero no exceda el rango de valores  $L/B$  presentadas en la Tabla N° 4.10; Así también se tiene que cuidar lo especificado en el acápite anterior.

La calibración analítica se realiza de la siguiente manera:

- a) Se establecen las dimensiones del vertedero ( $L$ ,  $B$ ), teniendo en cuenta los limites de usos del vertedero, vistos en el acápite anterior.
- b) Se construye una tabla (ver Tabla N° 4.11), asumiendo diferentes valores de  $h_1$ ; para cada  $h_1$  asumido se calcula el valor de  $h_1/p$ .
- c) Conociendo el valor de  $h_1/p$  así como el valor de  $L/B$ , se recurre a la Figura N° 4.22 y se obtiene el valor del coeficiente de descarga  $C_e$ .
- d) El valor de  $C_e$  se reemplaza en la ecuación (4-19) y se halla el caudal que pasa sobre el vertedero.

A continuación se presenta un ejemplo de calibración analítica, Para un vertedero que tiene las siguientes características geométricas:  $L = 2$  m,  $B = 5$  m y  $p = 0.35$  m.

**Desarrollo**

- a) Se halla la relación  $L/B$  y de la Tabla N° 4.10 se obtiene los valores de  $C_1$  y  $C_2$ ; para nuestro caso  $L/B = 0.4$ ,  $C_1 = 0.0317$  y  $C_2 = 3.164$ .
- b) Construir una tabla (ver Tabla N° 4.11), asumiendo diferentes valores de  $h_1$ ; note que  $h_1$  no puede ser menor a 0.06 m ni mayor a  $L/3$ .

$h_1$	$h_1/p$	$C_e$		$Q$ m <sup>3</sup> /s
		pies <sup>5</sup> /s	m <sup>5</sup> /s	
0.06	0.17	3.17	1.75	0.05
0.10	0.29	3.17	1.75	0.11
0.15	0.43	3.18	1.75	0.20
0.20	0.57	3.18	1.76	0.31
0.25	0.71	3.19	1.76	0.44
0.30	0.86	3.19	1.76	0.58
0.35	1.00	3.20	1.76	0.73
0.40	1.14	3.20	1.77	0.89
0.45	1.29	3.20	1.77	1.07
0.50	1.43	3.21	1.77	1.25
0.55	1.57	3.21	1.77	1.45
0.60	1.71	3.22	1.78	1.65
0.65	1.86	3.22	1.78	1.86

**Tabla N° 4.11: Caudal en Función de la Carga  $h_1$ , Usando la Ecuación (4-19)**

- c) Para cada valor de  $h_1$  se determina  $h_1/p$ , y empleando la ecuación (4-20) o recurriendo directamente a la Figura N° 4.22, se obtiene el valor de  $C_e$ .
- d) El caudal se encuentra al reemplazar  $C_e$ ,  $L$  y  $h_1$  en la ecuación (4-19). De este modo se ha obtenido un caudal  $Q$  ( $m^3/s$ ) para una carga  $h_1$  (m).
- e) Repitiendo los pasos b), c) y d), se confecciona una tabla de caudales en función de las cargas (ver Tabla N° 4.11).
- f) Los datos representados en la Tabla N° 4.11, se grafican para obtener una curva de caudales en función de las cargas (ver Figura N° 4.23).

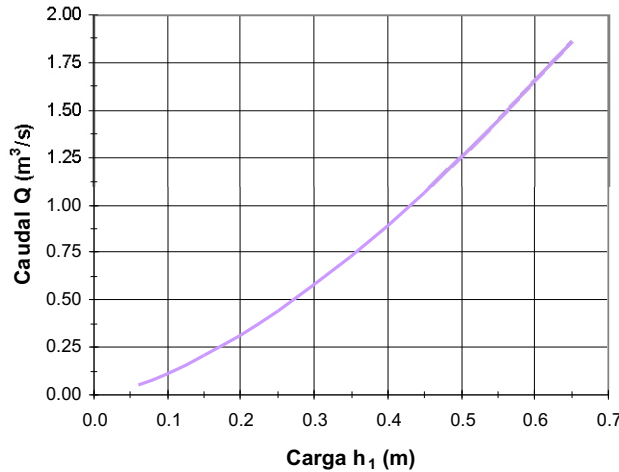


Figura N° 4.23: Curva de Caudales en Función de su Carga

#### 4.5.4.2 MEDICIÓN

Para medir los caudales que pasan sobre un vertedero se siguen los pasos:

- a) Sobre la regla graduada que se encuentra aguas arriba del vertedero, tomar lectura de la carga  $h_1$ .
- b) Con el valor de  $h_1$  se recurre a la tabla calibrada de caudales vs cargas, obteniéndose el caudal que le corresponde a la carga  $h_1$ .
- c) El caudal también se puede obtener de la curva caudales vs cargas, para ello se ingresa al eje X con el valor de la carga  $h_1$ , y interceptando la curva se lee en Y el caudal  $Q$ .

#### Ejemplo de lectura de caudales

Para este ejemplo tomaremos la curvas y la tabla obtenida en el desarrollo de la calibración.

Si tenemos una lectura de carga  $h_1$  igual a 0.25 m, el caudal se obtiene al recurrir a la Tabla N° 4.11 donde se lee  $Q = 0.44 m^3/s$ , así mismo el caudal puede ser obtenido si se recurre a la Figura N° 4.23.

Una forma práctica de calibrar vertederos contraídos, es empleando la ecuación de descarga propuesta por Francis en 1883, donde el coeficiente de descarga  $C_e$  es constante para todo valor de  $h_1$ , dicha ecuación se escribe:

$$Q = 1.84h_1^{3/2} (L-0.2h_1) \quad \dots(4-21)$$

Donde:

- Q : Caudal que pasa por el vertedero, (m<sup>3</sup>/s).
- L : Longitud del vertedero, (m).
- h<sub>1</sub> : Carga sobre el vertedero, (m).

En la ecuación (4-21) el coeficiente de descarga C<sub>e</sub> es constante y su exactitud queda garantizada para vertederos con longitudes de cresta mayores a 3.0 m y que a la vez operen cargas h<sub>1</sub> en el rango de 0.12 a 0.5 m. Para vertederos con dimensiones de cresta menores a 3.0 m la ecuación (4-21) da buenos resultados, siempre que se cumpla con las siguientes recomendaciones:

- La carga máxima a medir no exceda a L/3.
- La altura p, no debe de ser menor a 2 veces la carga máxima h<sub>1</sub>.
- Las contracciones laterales deben de estar ubicadas a la distancia de 2 veces la carga máxima h<sub>1</sub> de la cara del canal de aproximación.
- La medición de las cargas se debe de hacer aguas arriba del vertedero, a una distancia no menor de 4 veces la carga máxima h<sub>1</sub>.

#### **4.5.4.3 VERTEDEROS RECTANGULARES SIN CONTRACCIONES**

Estos vertederos ocupan todo el ancho del canal de aproximación (ver Figura N° 4.21 b). La ecuación de descarga para este tipo de vertederos, según Francis se escribe:

$$Q = 1.84 L (h_1)^{3/2} \quad \dots(4-22)$$

**69**

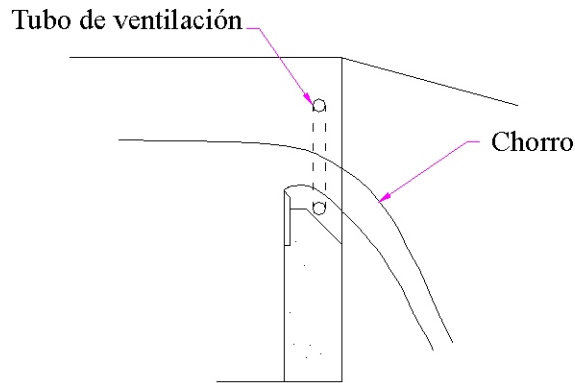
Donde:

- Q : Caudal que pasa por el vertedero, (m<sup>3</sup>/s).
- L : Longitud del vertedero, (m).
- h<sub>1</sub> : Carga sobre el vertedero, (m).

En los vertederos contraídos se tiene que cumplir con lo siguiente:

- El nivel de la cresta vertedera tiene que estar lo suficientemente alta, para asegurar que la descarga genere un vacío por debajo del chorro de agua, esto con el fin de evitar efectos de cavitación sobre la estructura del vertedero, en la Figura N° 4.24 se presenta una vista longitudinal de un vertedero rectangular sin contracciones.
- El nivel de la cresta p debe de ser mayor o igual a 3 veces el valor de la carga máxima h<sub>1</sub>.
- El valor de h<sub>1</sub> no debe ser menor a 0.06 m ni tampoco mayor a L/3, con esto se logra que el chorro que sale por el vertedero no se ahogue, evitando así alterar el nivel de la carga h<sub>1</sub>.
- Es necesario que la sección B, del canal de aproximación permanezca igual a la salida del vertedero, hasta una distancia no menor a 0.3 veces la máxima carga h<sub>1</sub>.
- La zona por debajo de la lamina vertiente siempre debe de estar ventilada.





**Figura N° 4.24:** Sección Longitudinal de un Vertedero Rectangular sin Contracciones

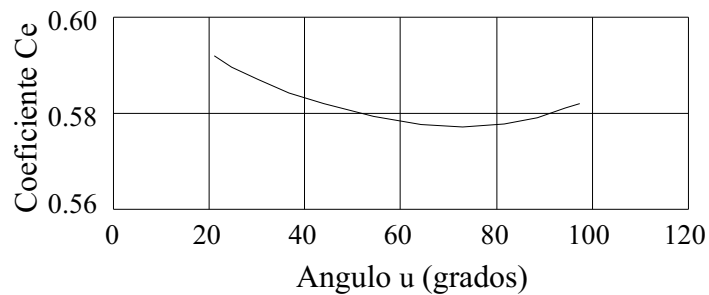
#### 4.5.5 VERTEDEROS TRIANGULARES

Las relaciones que se presentan a continuación pueden ser usadas para vertederos triangulares con abertura angular que va desde los 25° hasta los 100°. La ecuación de descarga para vertederos triangulares en función de su ángulo  $u$  se escribe:

$$Q = 2.363C_e \tan \frac{u}{2} h_1^{2.5} \quad \dots(4-23)$$

Donde:

- $Q$  : Descarga sobre el vertedero en  $m^3/s$ .
- $C_e$  : Coeficiente de descarga efectivo (ver Figura N° 4.25).
- $h_1$  : Carga sobre el vertedero en m.
- $u$  : Angulo del vertedero triangular.



**Figura N° 4.25:** Coeficiente  $C_e$ , para Vertederos Triangulares Contraidos y con cualquier Angulo , (National Bureau of Standars, Kulin et al. [1975])

### **Limites de uso**

En este tipo de vertederos se recomienda cumplir con lo siguiente:

- Aguas abajo del vertedero, el nivel del agua no debe estar a menos de 0.06 m es por debajo del vértice del vertedero. Cuando por debajo del chorro no existe aire, la lectura de la carga debe ser descartada.
- La carga  $h_1$  debe ser mayor o igual a 0.06 m, por debajo de este valor existen errores que no se pueden despreciar.
- En vertederos triangulares que son totalmente contraídos, el máximo valor de la carga  $h_1$  debe de ser 0.38 m. Cuando el vertedero es parcialmente contraído el máximo valor de  $h_1$  debe ser 0.61 m.
- En vertederos triangulares totalmente contraídos, la relación  $h_1/B$  debe de ser igual o menor que 0.2. Si el vertedero está parcialmente contraído y  $u=90^\circ$ , la relación  $h_1/B$  debe ser igual o menor a 0.4.
- El ancho medio del canal de aproximación  $B$ , debe ser mayor que 0.90 m cuando el vertedero esta totalmente contraído. Cuando el vertedero está parcialmente contraído, el ancho  $B$  debe ser mayor a 0.61 m.
- La altura del vértice de un vertedero triangular totalmente contraído, medido desde el fondo del canal, no debe ser menor a 0.45 m. Si el vertedero esta parcialmente contraído y  $u=90^\circ$ , la altura del vértice del vertedero no debe ser menor a 0.10 m.

**71**

#### **4.5.5.1 VERTEDEROS TRIANGULARES TOTALMENTE CONTRAÍDOS Y CON $\theta=90^\circ$**

Este tipo de vertederos es muy útil cuando se pretende medir caudales pequeños. La ecuación de descarga para este vertedero se escribe:

$$Q = 1.34 h_1^{2.48} \quad \dots(4-24)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa sobre el vertedero, ( $m^3/s$ ).  
 $h_1$  : Carga sobre el vertedero, (m).

#### **Limites de los vertederos triangulares con $u=90^\circ$**

Los limites de uso de este vertedero son:

- La altura  $p$ , del fondo del canal alimentador al vértice del vertedero no debe ser menor a 2 veces la carga máxima ( $h_1$ ).
- El filo del vertedero debe estar biselado con un ángulo de  $45^\circ$ .
- Si la carga  $h_1$  a medir estaría siempre cerca al limite de 0.06 m, entonces el biselado debe ser de  $60^\circ$ .
- Para que el vertedero este totalmente contraído, la sección vertedera debe de estar ubicada a no menos de 2 veces la carga máxima  $h_1$ , del borde del canal de aproximación a la sección del vertedero.
- La medición de la carga se debe de hacer aguas arriba del vertedero, a una distancia no menor de 4 veces la carga máxima  $h_1$ .
- El rango apropiado de uso de estos vertederos, es para caudales de  $0.0014 m^3/s$  (1.42 lps) a  $0.12 m^3/s$  (120.3 lps), se recomienda no usarlo cerca de los limites establecidos.

**Limites de los vertederos triangulares con  $\alpha=90^\circ$**

Los limites de uso de este vertedero son:

- La altura  $p$ , del fondo del canal alimentador al vértice del vertedero no debe ser menor a 2 veces la carga máxima ( $h_1$ ).
- El filo del vertedero debe estar biselado con un ángulo de  $45^\circ$ .
- Si la carga  $h_1$  a medir estaría siempre cerca al limite de 0.06 m, entonces el biselado debe ser de  $60^\circ$ .
- Para que el vertedero este totalmente contraído, la sección vertedera debe de estar ubicada a no menos de 2 veces la carga máxima  $h_1$ , del borde del canal de aproximación a la sección del vertedero.
- La medición de la carga se debe de hacer aguas arriba del vertedero, a una distancia no menor de 4 veces la carga máxima  $h_1$ .
- El rango apropiado de uso de estos vertederos, es para caudales de  $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$  (1.42 lps) a  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$  (120.3 lps), se recomienda no usarlo cerca de los limites establecidos.

**4.5.5.2 CALIBRACIÓN ANALÍTICA**

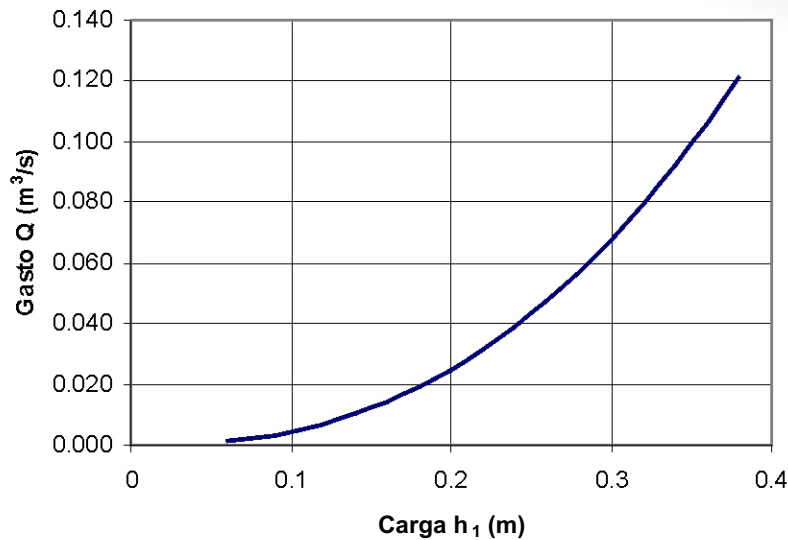
La calibración analítica de este vertedero, se da de una manera similar al realizado en el caso del vertedero rectangular, para ello se siguen los siguientes pasos:

- a) Se construye una tabla (ver Tabla N° 4.12), que contiene una columna de cargas  $h_1$  y una columna de caudales  $Q$ , luego en la columna de cargas  $h_1$  se asumen diferentes valores de  $h_1$ .
- b) Cada valor de  $h_1$ , es reemplazado en la ecuación (4-24), así se obtiene un valor de caudal  $Q$  correspondiente a cada valor de  $h_1$ .

$h_1$ (m)	$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
0.06	0.001
0.10	0.004
0.14	0.010
0.18	0.019
0.22	0.031
0.26	0.047
0.28	0.057
0.30	0.068
0.32	0.079
0.34	0.092
0.36	0.106
0.38	0.122

**Tabla N° 4.12:** Relación, Carga  $h_1$  vs Caudal  $Q$ , empleando la Ecuación (4-24)

- c) La Tabla N° 4.12, puede ser expresada gráficamente, obteniendo una curva de descarga  $h_1$  vs caudal  $Q$ , tal como se ve en la Figura N° 4.26.



**Figura N° 4.26:** Curva Caudal  $Q$  vs Carga  $h_1$ , para Vertedero Triangular

#### 4.5.5.3 MEDICIÓN

Para medir los caudales que pasan sobre el vertedero triangular se siguen los pasos:

- Sobre la regla graduada que se encuentra aguas arriba del vertedero, se toma la lectura de la carga  $h_1$ .
- Con el valor de  $h_1$  se recurre a la tabla calibrada de caudales vs cargas, en esa tabla se obtiene el caudal que le corresponde a la carga  $h_1$ .
- El caudal también se puede obtener de la curva caudales vs cargas, para ello se ingresa al eje X con el valor de la carga  $h_1$ , y interceptando la curva se lee en Y el gasto  $Q$ .

**73**

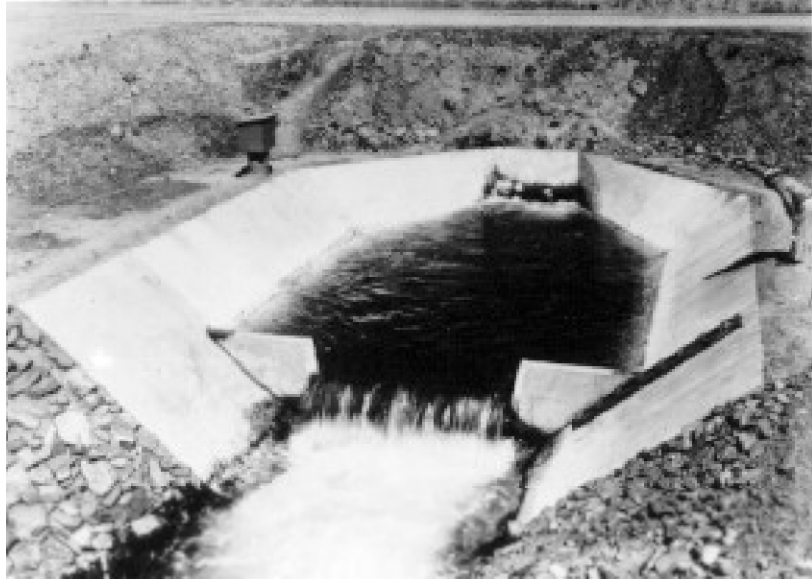
#### Ejemplo de lectura de caudales

Para este ejemplo tomaremos la curvas y la tabla obtenida en el desarrollo de la calibración del vertedero triangular.

Si tenemos una lectura de carga  $h_1$  igual a 0.18 m, el caudal se obtiene al recurrir a la Tabla N° 4.12 y se lee  $Q = 0.019 m^3/s$ , así mismo el gasto puede ser obtenido si se recurre a la Figura N° 4.26.

#### 4.5.6 VERTEDERO CIPOLLETI

Este vertedero tiene la forma trapezoidal y su sección vertedera es ubicada bastante lejos del fondo y paredes del canal de aproximación, con el fin de producir una contracción total. La inclinación de los lados del vertedero tiene la proporción 1:4. En la Figura N° 4.21c se aprecia el esquema de este tipo de vertederos, y en la Figura N° 4.27 se observa una vista del vertedero Cipolletti en el campo.



**Figura N° 4.27:** Vista de un Vertedero Trapezoidal (Vertedero Cipolletti)

La ecuación que rige la descarga en los vertederos Cipolletti se escribe:

$$Q = 1.859 L h_1^{3/2} \quad \dots(4-25)$$

Donde:

- $L$  : Longitud de la cresta vertedera, (m).  
 $h_1$  : Carga sobre la cresta vertedera, (m).

#### **Limite de los vertederos Cipolletti**

- La exactitud de las mediciones hechas con vertederos Cipolletti, es considerablemente menor a las mediciones hechas con vertederos rectangulares o vertederos triangulares (Shen, 1959).
- La altura del vertedero desde el fondo del canal  $p$ , debe de ser no menos del doble del valor de la carga máxima  $h_1$ .
- La distancia de la arista del vertedero a la pared del canal de aproximación, no debe ser menor a 2 veces la carga máxima  $h_1$ .
- La carga mínima que puede ser medida por el vertedero Cipolletti es de 0.06 m, y la carga máxima no debe exceder el valor de  $L/3$ .
- La lectura de la carga  $h_1$ , debe realizarse a una distancia no menor de 4 veces la carga máxima  $h_1$ , aguas arriba del vertedero.

#### **4.5.6.1 CALIBRACIÓN**

Para calibrar analíticamente un vertedero Cipolletti, se siguen los pasos:

- a) Se establece la longitud  $L$  del vertedero; al mismo tiempo se verifica que no se violen las restricciones para este tipo de vertederos.
- b) Se construye una tabla (ver Tabla N° 4.13), que contiene una columna de cargas  $h_1$  y una columna de caudales  $Q$ ; en la columna de cargas  $h_1$  se asumen diferentes valores de  $h_1$ .

- c) Para cada valor de  $h_1$  asumido, se le halla el caudal  $Q$  reemplazado  $h_1$  y  $L$  en la ecuación (4-25).
- d) En la Tabla N° 4.13, se completa el valor del gasto  $Q$ , para cada valor de  $h_1$  asumido, empleando la ecuación (4-25) y siguiendo el paso c).

$h_1$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
0.06	0.051
0.10	0.109
0.14	0.180
0.18	0.263
0.22	0.355
0.26	0.456
0.30	0.565
0.34	0.682
0.38	0.806
0.42	0.936
0.46	1.073
0.50	1.216
0.54	1.365
0.58	1.519
0.62	1.679

Tabla N° 4.13: Relación, Carga  $h_1$  vs Caudal  $Q$ , empleando la Ecuación (4-25)

- e) La Tabla N° 4.13, se puede expresar gráficamente, mediante una curva de caudales  $Q$  vs carga  $h_1$ , tal como se ve en la Figura N° 4.28.

75

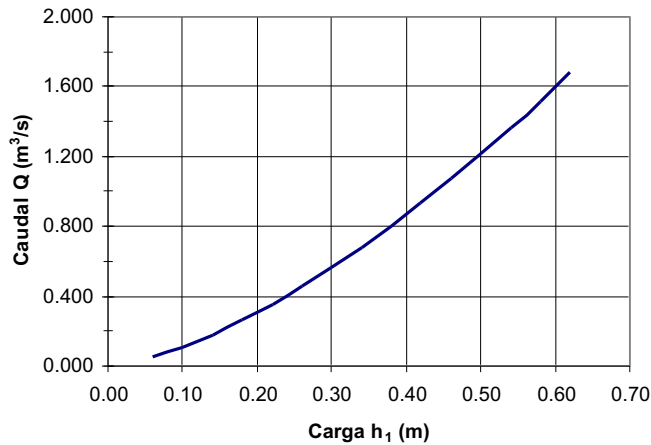


Figura N° 4.28: Curva Caudal  $Q$  vs Carga  $h_1$ , para Vertedero Cipolletti

#### 4.5.6.2 MEDICIÓN

Los caudales que pasan sobre el vertedero Cipolletti se miden siguiendo los pasos:

- a) En la regla graduada que se encuentra aguas arriba del vertedero, se toma la lectura de la carga  $h_1$ .
- b) El valor de  $h_1$  se lleva a una tabla calibrada de caudales vs cargas, allí se obtiene el gasto que le corresponde a dicha carga.
- c) El caudal también puede ser obtenido de una curva caudales vs cargas, para ello se ingresa el valor de  $h_1$  en el eje X y interceptando la curva se lee en Y el caudal  $Q$ .

### **Ejemplo de lectura de caudales**

Para este ejemplo tomaremos la curvas y la tabla obtenida en el desarrollo de la calibración del vertedero Cipolletti.

Si tenemos una lectura de carga  $h_1$  igual a 0.62 m, el caudal se obtiene al recurrir a la Tabla N° 4.13 y se lee  $Q = 1.679 \text{ m}^3/\text{s}$ , así mismo el caudal puede ser obtenido si se recurre a la Figura N° 4.28.

### **4.5.7 CALIBRACION EN CAMPO**

Para calibrar un vertedero en campo, se debe de tener un dispositivo que permita medir los caudales, como puede ser un molinete. Para la calibración en campo empleando molinetes se toman en cuenta los siguientes pasos:

- a) Limpiar la estructura a calibrar, en especial la regla y la zona donde se encuentra el vertedero.
- b) Con la ayuda de un molinete, ubicado aguas abajo del vertedero, se determina el caudal, simultáneamente se mide el nivel del agua sobre la la regla graduada que se encuentra aguas arriba del vertedero, con esto se logra una relación de la carga  $h_1$  con el gasto  $Q$ .
- c) Repitiendo el paso anterior, tantas veces como cambia el nivel del agua  $h_1$  y midiendo a la vez el caudal que pasa por el vertedero, se construye una curva de elevaciones de carga  $h_1$  vs caudales  $Q$ .
- d) El paso c) se debe realizar al menos tres veces; luego se deben dibujar las curvas de calibración del vertedero sobre una misma escala gráfica, y allí dibujar una curva de ajuste que represente el promedio de las curvas de calibración. Lo anterior permite minimizar los errores de lectura en campo. En el desarrollo de la calibración de la estaciones limnimétricas se detalla el procedimiento para la obtención de la curva de ajuste.
- e) Los vertederos son estructuras de medición con muy buen grado de precisión, por lo que no se recomienda calibrarlo con métodos aproximados como: el método de sección de control o el método del flotador.

## **4.6 COMPUERTAS**

### **4.6.1 INTRODUCCIÓN**

En caso de no contar con aforadores convencionales y a la necesidad de aforar los caudales, el uso de compuertas calibradas es una solución muy utilizada y de simple operación.

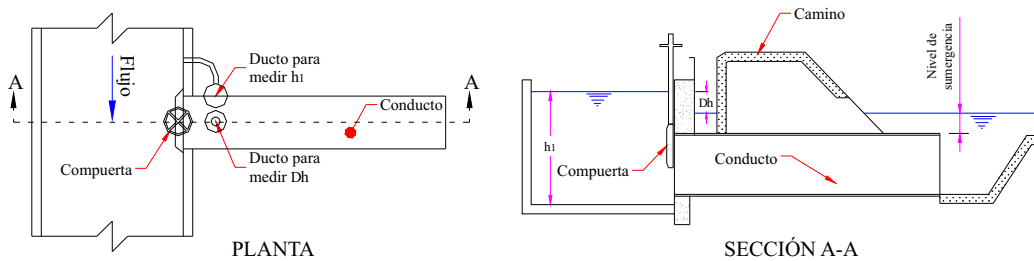
Las compuertas que pueden ser calibradas son las que se encuentran en las tomas de distribución. Estas compuertas cuentan con reglas graduadas para medir la diferencia de cargas, luego mediante una tabla de descarga o una gráfica de descargas elevaciones previamente calibrada, se obtiene el caudal derivado.

Se recomienda que el material empleado para la construcción de las reglas sea de acero, el cual debe estar debidamente pulido y protegido para evitar la corrosión. Otro material muy recomendado para la construcción de reglas es la fibra de vidrio, aunque también es posible emplear la madera para tal fin. Cualquiera sea el material

empleado para la construcción de las reglas, se debe cuidar la calidad, con el fin de garantizar la durabilidad y el buen estado para la lectura de mediciones. Cuando no sea posible colocar una regla graduada se puede entonces gravar la regla sobre la pared de la toma o de ser el caso dibujarla con un tipo de pintura que sea resistente a la humedad y a la abrasión de las corrientes.

#### 4.6.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

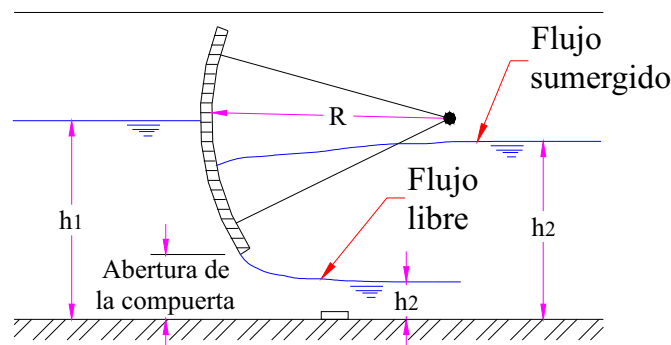
Las compuertas empleadas para medir caudales forman parte de una estructura de toma, que a su vez posee una sección de entrada, un conducto rectangular o circular (para atravesar las vermas de los canales) y una sección de salida, tal como se ve en la Figura N° 4.29.



**Figura N° 4.29:** Esquema de una Toma con Compuerta Calibrada

**77**

Por otro lado también existen compuertas radiales que permiten medir caudales, en la Figura N° 4.30 se presenta un esquema de dicha compuerta, allí se aprecia las dos condiciones de funcionamiento que tienen estas estructuras (flujo libre y flujo sumergido).



**Figura N° 4.30:** Esquema del Funcionamiento de una Compuerta Radial en Canales Grandes o Bocatomas

Tanto las compuertas de toma como las compuertas radiales funcionan bajo el principio de descarga en orificio, presentándose los siguientes dos casos: (a) descarga libre, cuando el flujo que atraviesa la compuerta está en contacto con el aire, y el chorro que sale de la compuerta forma un resalto hidráulico generando aguas abajo de la compuerta un tirante aproximadamente igual al tirante que circula por el canal; (b) descarga sumergida, cuando el flujo que sale por la compuerta lo hace por debajo del agua (ahogado), es decir el nivel del agua pasando la compuerta está por encima del orificio de la compuerta.



### **4.6.3 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA CALIBRAR COMPUERTAS**

Previamente a la rutina de mantenimiento, la información sobre el estado de las estructuras de medición obtenida a través del inventario o inspección de la infraestructura, debe dar la pauta a fin de que las gerencias técnicas de las JU planifiquen la calibración de estructuras de medición entre las que se incluye las compuertas.

La calibración de compuertas debe ser una practica periódica y debe realizarse al menos una vez al año. También se deben calibrar las compuertas, si se aprecia que la estructura o sus alrededores han sufrido variaciones por efectos de erosión o sedimentación, así como si se observa la presencia de elementos que generen perturbación en el flujo, dentro del canal de acercamiento o en las inmediaciones de la compuerta.

Para garantizar el buen funcionamiento y exactitud de las compuertas aforadoras, se deben calibrar cuando se presenten las siguientes circunstancias:

- a) Después de la reparación de la estructura, así como después de la limpieza y remoción de malezas, sedimentos y basuras que se encuentran ubicadas antes o después de las compuertas.
- b) Cuando la compuerta funciona sumergida y el nivel de sumergencia es bajo, se producen errores al medir las descargas; siendo recomendable calibrar la compuerta en campo, para así determinar cuales son los niveles mínimos de sumergencia, que se requieren para obtener mediciones de caudales exactos. Para prevenir estos problemas se debe considerar una sumergencia equivalente a 0.30 m, y siempre que sea posible, la sumergencia no debe ser menor al diámetro del conducto. Bajo la condición aquí descrita, es necesario cuidar que el flujo sea sumergido, tanto a la entrada del conducto como a la salida.
- c) Si la lectura de las diferencias de carga  $h$  son pequeñas, es conveniente analizar el funcionamiento de la compuerta, debido a que mientras más pequeña sea la diferencia de carga  $h$ , mayor es la probabilidad de cometer errores al medir los niveles de la superficie del agua, trayendo como consecuencia una sobreestimación o subestimación del caudal. Lo anterior se puede evitar si la calibración de la compuerta se realiza en campo, con ayuda de un correntómetro, ya que sólo así se podrá saber cuál es el rango óptimo de operación de la compuerta. Si se hace imprescindible medir diferencias de cargas pequeñas, se deben considerar reglas con un mayor numero de marcas, por lo menos al inicio de la graduación.

**4.6.4 CALIBRACIÓN ANALÍTICA**

**4.6.4.1 FLUJO SUMERGIDO**

En general la mayoría de las tomas de riego están diseñadas para trabajar a flujo sumergido y bajo esta condición el principio que gobierna la descarga es el de orificio sumergido, donde el gasto es función directa de la pérdida de carga  $Dh$ , tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q = C_d A (g h)^{0.5} \quad \dots(4-26)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal que pasa por la compuerta, (m<sup>3</sup>/s).
- $C_d$  : Coeficiente de descarga.
- $A$  : Área de la abertura de la compuerta, (m<sup>2</sup>).
- $g$  : Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>.
- $h$  : Diferencia de carga, (m),  $Dh = h_1 - h_2$ .

Para compuertas que operan a flujo sumergido el valor de  $C_d$  puede ser tomado igual a 0.62. A continuación se describen los pasos a seguir para la calibrar analíticamente compuertas.

- a) Para una abertura de compuerta  $hc$ , se toma la medida de  $h_1$  y  $h_2$ , para luego obtener la diferencia de carga  $Dh = h_1 - h_2$ .
- b) Conociendo la abertura y el ancho de la compuerta, se calcula el área de la sección de descarga  $A$ .
- c) Reemplazando los valores de  $A$  y  $Dh$  en la ecuación (4-26) se obtiene el caudal que pasa por la compuerta.  $Q = 0.62A(2*9.81h)^{0.5}$
- d) En el paso c) se obtuvo el caudal para una abertura de compuerta y un  $Dh$  dado. Repitiendo los pasos de a) a c), se puede obtener una tabla (ver Tabla N° 4.14) de caudales  $Q$  en función de la diferencia de carga  $Dh$ .

Ah (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0.060	0.10
0.100	0.13
0.150	0.16
0.200	0.18
0.250	0.21
0.300	0.23
0.350	0.24
0.400	0.26
0.450	0.28
0.500	0.29
0.550	0.31
0.600	0.32

**Tabla N° 4.14:** Caudales en Función de Diferencias de Carga  $h$ , para Compuerta de  $A = 1.0 \times 0.15 \text{ m}^2$ , con Abertura  $hc = 0.15 \text{ m}$  y  $Q = 0.412 h^{0.5}$

- e) La Tabla N° 4.14 se expresa gráficamente en la Figura N° 4.31, obteniendo así una curva calibrada para una abertura de compuerta  $h_c$ .

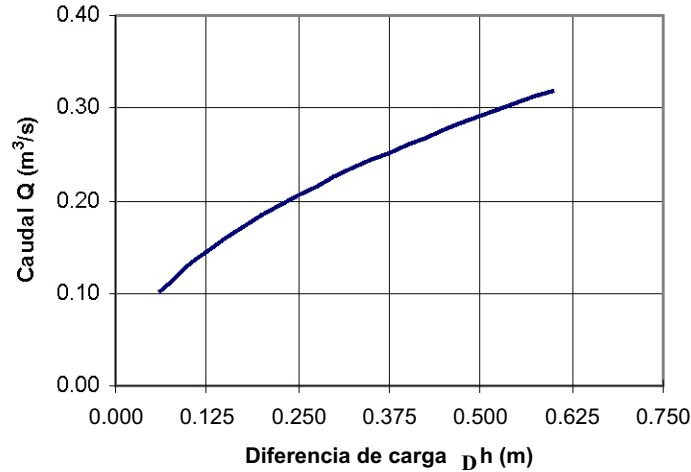


Figura N° 4.31: Gráfico de Caudal  $Q$  vs diferencia de Carga  $h$ , para Compuerta de  $A = 1.0 \times 0.15 \text{ m}^2$ , con Abertura  $h_c = 0.15 \text{ m}$  y  $Q = 0.412 \text{ h}^{0.5}$

- f) Para poder medir un rango amplio de caudales en compuertas, se construye una familia de curvas, una para cada abertura de compuerta (ver Figura N° 4.32).

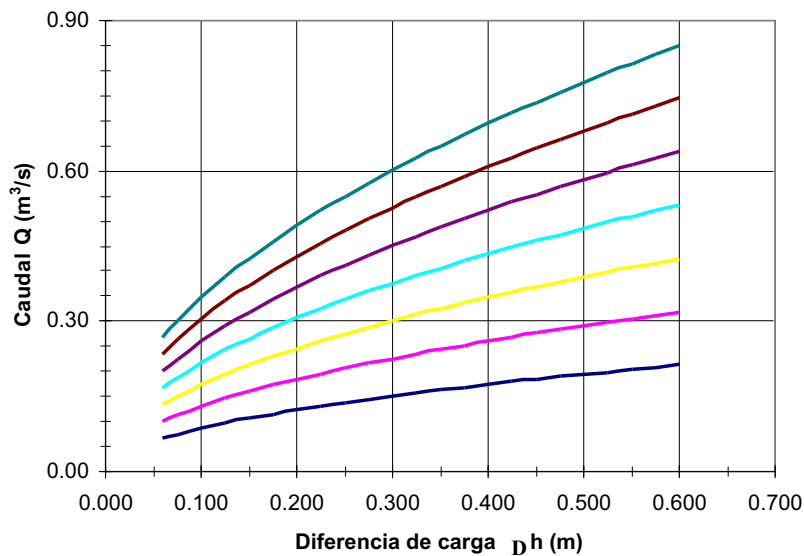


Figura N° 4.32: Curvas de Caudal  $Q$  vs Diferencia de Carga  $h$ , para una Compuerta de Ancho  $b = 1.0 \text{ m}$ , Coeficiente de Descarga  $C_d = 0.62$  y Diferentes Valores de Abertura de Compuerta  $h_c$ .

#### 4.6.4.2 FLUJO LIBRE

La calibración analítica de compuerta a flujo libre es tediosa y poco práctica, por lo que se sugiere mejor una calibración en campo

**4.6.5 CALIBRACION EN CAMPO**

**4.6.5.1 FLUJO SUMERGIDO**

La calibración en campo de compuertas (rectangulares y radiales) que funcionan a flujo sumergido, se realiza considerando los siguientes pasos:

- a) Asegurarse que la zona de trabajo se encuentre en condiciones para realizar la calibración, es decir que no exista riesgos para la vida o la salud de los operadores.
- b) Tener preparado todas las herramientas necesarias para llevar a cabo la calibración, tal como: correntómetro, libreta de apuntes, formatos, winchas, herramientas para el desbroce de malezas, cuerdas, etc.
- c) Cerciorarse que el correntómetro este operando correctamente, así como de conocer los límites de operación del aparato, esto con el fin de que las mediciones sean confiables.
- d) Verificar que las reglas graduadas estén debidamente instaladas, en un lugar firme y que las graduaciones sean legibles.
- e) Iniciar la calibración, abriendo la compuerta a una determinada altura, luego anotar las medidas tomadas de las reglas graduadas (aguas arriba y aguas abajo), la diferencia de las lecturas en las reglas es lo que se llama la diferencia de carga  $Dh$ . Simultáneamente a esta operación se debe de tomar la medida del caudal que pasa por el correntómetro, y de este modo obtenemos un valor del caudal para una diferencia de carga  $Dh$ .
- f) El paso anterior se realiza tantas veces como sea necesario, obteniendo así los suficientes datos como para construir una curva de elevaciones caudales (ver Figura N° 4.31).
- g) Es recomendable que los pasos e) y f), se repitan por lo menos tres veces y en épocas diferentes, con fin de construir nuevas curvas de calibración, para luego obtener una curva de ajuste (ver Figura N° 4.33) que nos represente el promedio de las curvas anteriores; el objetivo de esta practica es reducir los errores que se pueden producir en la medición.

81

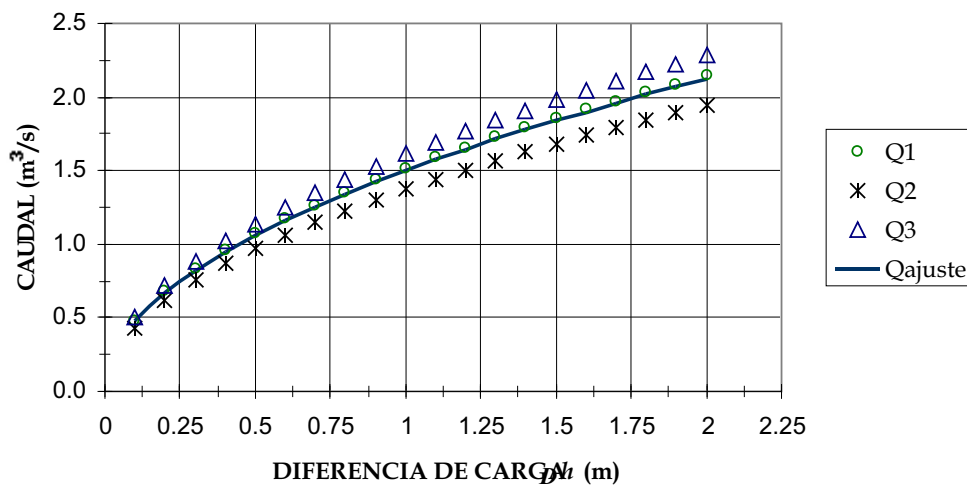
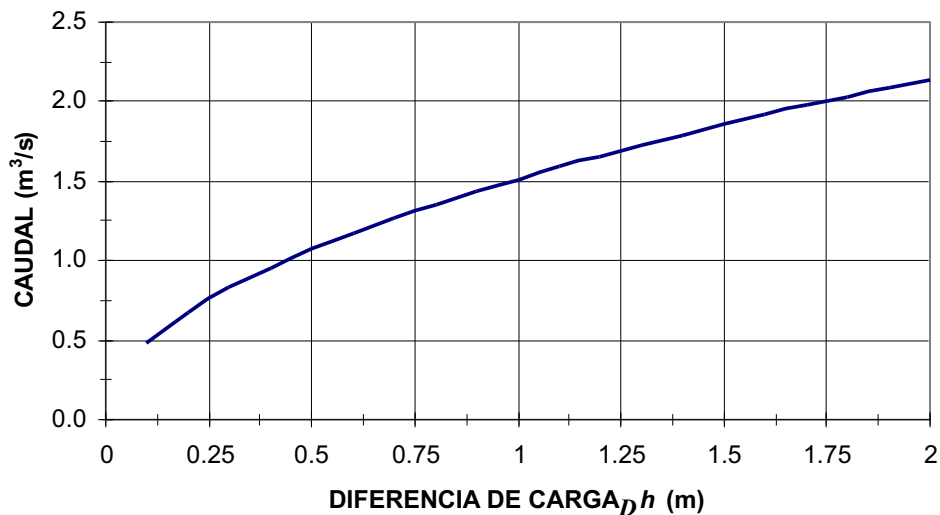


Figura N° 4.33: Curva de Elevaciones Caudales ajustada, para Compuertas Calibradas

#### **4.6.5.2 FLUJO LIBRE**

La calibración en compuertas que funcionan bajo la condición de flujo libre, se realiza según los siguientes pasos:

- a) Los pasos de a) a f) descritos en el acápite anterior, también son validos para el desarrollo de ésta metodología de calibración.
- b) A diferencia de la descarga sumergida, aquí sólo servirá tomar datos cuando la compuerta este funcionando como flujo libre, es decir el chorro que sale por la compuerta está en contacto con el aire.
- c) Con las precauciones descritas en el caso de flujo sumergido, la calibración se inicia abriendo la compuerta a una determinada altura, luego en la regla de aguas arriba se mide el nivel de la superficie del agua, después se toma la medida de la abertura de la compuerta; la resta de las mediciones anteriores viene hacer la diferencia de carga  $Dh$ . Simultáneamente a esta operación, aguas abajo con la ayuda de un correntómetro, se afora el caudal que pasa por la compuerta, y de este modo obtenemos un valor del caudal para una diferencia de carga  $Dh$ .
- d) Con el paso anterior se obtuvo el caudal en función de  $Dh$ ; realizando el mismo procedimiento repetidas veces, se obtiene una tabla de datos que relacionan a  $Dh$  con su gasto, lo que luego nos permitirá graficar una curva elevaciones - caudales (ver Figura N° 4.34).
- e) Para disminuir los errores de medición se recomienda repetir los pasos c) y d), al menos tres veces; sobre las curvas graficadas en un mismo papel y escala se dibuja una curva de ajuste, que represente el promedio de las mediciones de calibración (ver Figura N° 4.35).



**Figura N° 4.34: Curva Elevaciones Caudales para Compuertas Radiales Funcionando a Flujo Libre**

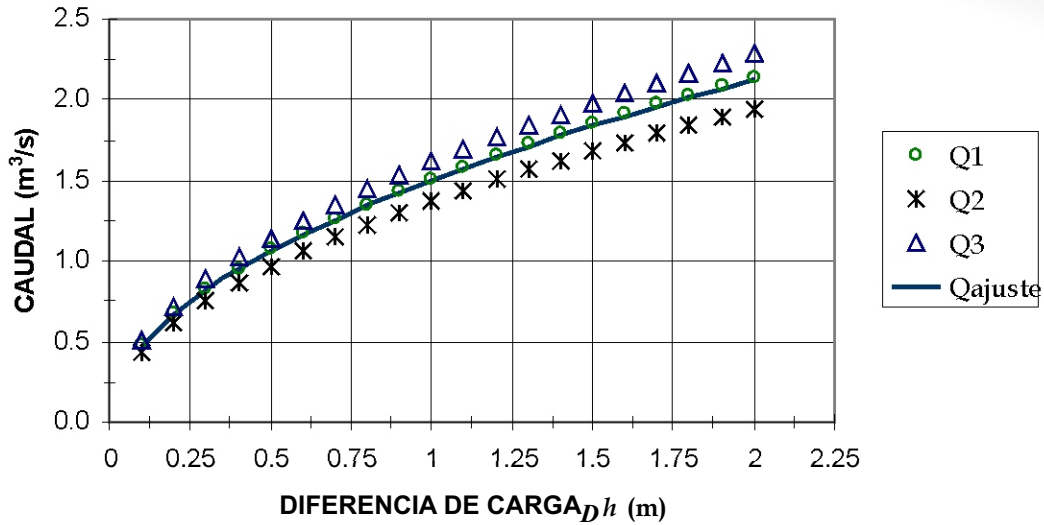


Figura N° 4.35: Curva Elevaciones Caudales Ajustada, Compuerta Radial Funcionando a Flujo Libre

#### 4.6.6 MEDICIÓN

Para obtener los caudales que pasan a través de una compuerta calibrada se procede como sigue:

- Se toma la lectura de la superficie del agua en la regla que se encuentra aguas arriba de la compuerta ( $h_1$ ), del mismo modo se toma la lectura en la regla que esta aguas abajo ( $h_2$ ), con las lecturas obtenidas se encuentra la diferencia de carga ( $Dh = h_1 - h_2$ ).
- Conociendo la diferencia de carga  $Dh$ , así como el funcionamiento de la compuerta (libre o sumergida), se recurre a una tabla de descargas (Tabla N° 4.14) o a una curva de elevaciones - caudales (Figura N° 4.36), para convertir la diferencia de carga  $Dh$  a su equivalente en caudal.
- Si el caudal obtenido no es el deseado, se procede a operar la compuerta (abrir o cerrar), y realizando los pasos anteriores se obtiene el nuevo caudal.

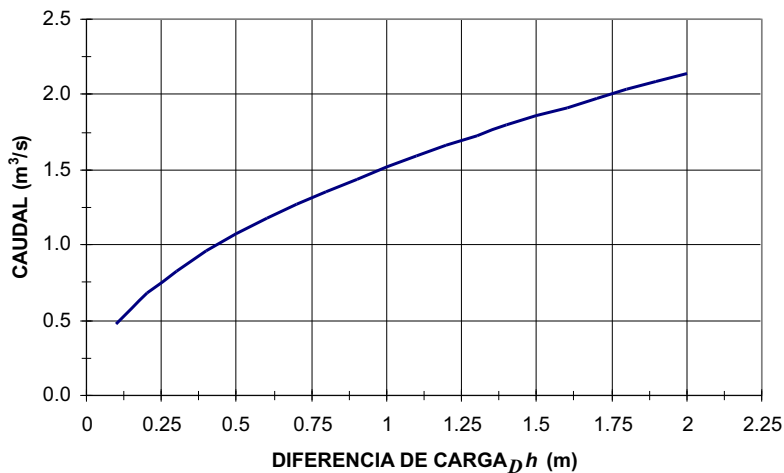


Figura N° 4.36: Curva Elevaciones Caudales para Tomas con Compuertas Calibradas

### Ejemplo

En las reglas de una compuerta calibrada se midió  $h_1 = 1.35$  m,  $h_2 = 0.85$  m, se pide determinar el caudal que pasa por la compuerta.

### Desarrollo

- Con los valores de  $h_1$  y  $h_2$ , se halla  $Dh = h_1 - h_2 = 0.5$  m.
- Recurriendo al eje X de la Figura N° 4.36, con  $Dh = 0.5$  m, se proyecta una línea e intercepta la curva, proyectando la intercepción de la curva al eje Y obtenemos  $Q = 1.15$  m<sup>3</sup>/s.

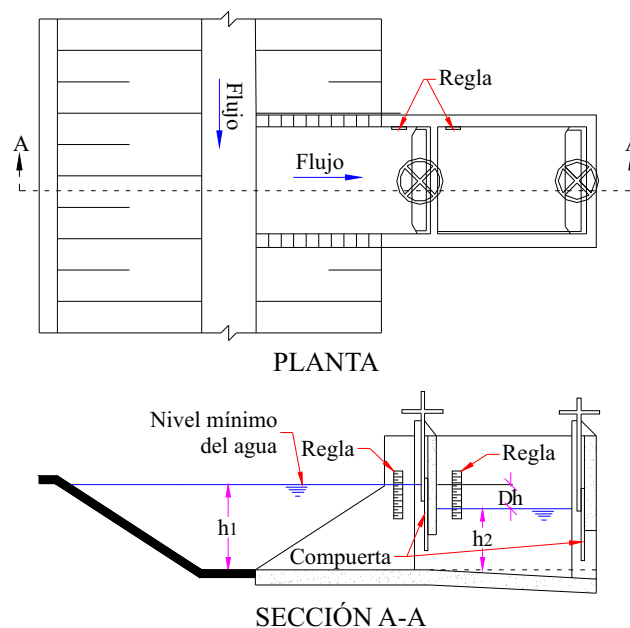
## 4.7 TOMAS CON ORIFICIO DE CARGA CONSTANTE

### 4.7.1 Introducción

Una estructura de medición frecuentemente usada en la derivación o distribución de agua es el uso de tomas, que regulan el flujo y a la vez sirven para medir caudales, siendo una alternativa muy práctica que proporciona información confiable sobre todo cuando se dispone de pocos recursos económicos como para construir un aforador por separado. Estas estructuras de toma tienen la ventaja de combinar un sistema de control (compuerta de regulación) con un sistema de medición (compuerta de medición).

### 4.7.2 Descripción de la Estructura

Las estructuras de toma con orificio de carga constante, son usualmente ubicadas formando un ángulo recto con el eje del canal principal, en la Figura N° 4.37 se presenta el esquema típico de estas estructuras.



**Figura N° 4.37:** Esquema Típico de una Toma que funciona como un Orificio de Carga Constante

Las estructuras de toma con orificio de carga constante, se compone de los siguientes elementos:

#### **Canal de entrada**

Es un canal corto que dirige el flujo del canal principal hacia la entrada de la estructura que se encuentra regulada por una compuerta.

#### **Poza de quietamiento**

Es una estructura en forma de poza, que cumple la función de aquietar el flujo para medir las cargas.

#### **Estructura de conducción**

Es un conducto que conecta la poza de quietamiento con el canal de derivación o canal parcelario; esta estructura posee una compuerta a la entrada, que sirve para regular los caudales.

El sistema de medición en este tipo de estructuras es mediante el uso de dos compuertas; la primera permite el ingreso del flujo a una poza de quietamiento, allí se realiza la medición de la carga; esta compuerta cumple con la función de generar el efecto de orificio sumergido; la segunda compuerta se ubica aguas abajo de la primera y sirve para regular el caudal que ingresa por la toma.

**85**

Según el Bureau of Reclamation, la precisión para medición de caudales, empleando este tipo de estructuras es del 3%, siempre y cuando se mantenga una diferencia de carga  $h = 0.06$  m.

#### **4.7.3 Calibración Analítica**

La calibración analítica de este tipo de estructuras, se lleva a cabo empleando la ecuación de orificio sumergido, que se escribe:

$$Q = C_d A \sqrt{2g h} \quad \dots(4-27)$$

Donde:

$Q$  : Caudal, ( $m^3/s$ ).

$C_d$  : Coeficiente de descarga.

$A$  : Área del orificio ( $m^2$ ).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

$h$  : Diferencia de cargas, (m).

$$h = h_1 - h_2$$

$h_1$  : Carga aguas arriba, (m).

$h_2$  : Carga aguas abajo, (m).

Los coeficientes de descarga  $C_d$ , varían de 0.68 a 0.72, siendo un valor recomendado de 0.70.

Según Aisenbrey et al en 1978, propuso que para calibrar estructuras de toma que no excedan caudales de  $0.85 m^3/s$ , se debe considerar lo siguiente:



- Para capacidades máximas de  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ , el valor de la longitud del pozo quietador debe ser: 2.5 veces la máxima abertura de la compuerta ó 1.75 veces el alto del orificio sobre la pared, pero nunca debe ser menos de 1.07 m.
- Para capacidades entre  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ , la longitud del pozo quietador debe ser 2.5 veces la máxima abertura de la compuerta. El nivel del fondo debe de ser horizontal.
- La abertura de la compuerta debe de ser menor o igual que 0.8 veces el alto del orificio sobre la pared.
- La distancia del fondo de la compuerta a la cima de la compuerta (sección de captación) debe ser menor o igual a la altura de las paredes que soporta a las compuertas.
- La sumergencia del flujo sobre la cima de la abertura en la primera compuerta, debe ser 1.78 veces la carga de velocidad del canal principal mas 0.08 m.
- La diferencia de carga  $h$  debe ser mayor a 0.06 m, cuidando que el chorro siempre este sumergido.

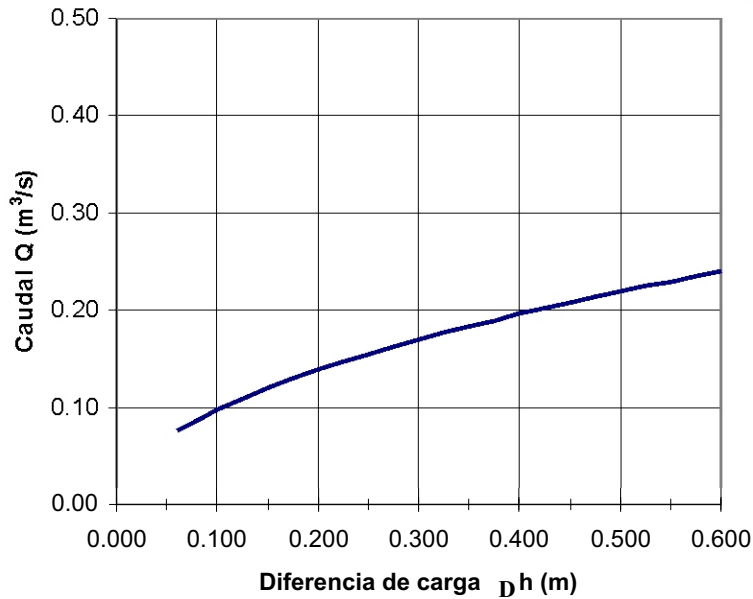
Para la calibración analítica de la toma con orificio de carga constante, se procede de la siguiente forma:

- a) Para una abertura dada en la primera compuerta, se calcula el área de su sección, que representa el área del orificio por donde sale el chorro.
- b) Conociendo el área de la sección de descarga de la primera compuerta, se asumen diferentes valores de  $h$ , los cuales se colocan en una tabla (ver Tabla N° 4.15).
- c) Conociendo el área de la descarga  $A$ , así como el coeficiente  $C_d$ , se recurre a la ecuación (4-27) y para cada valor de  $h$  asumido en el paso b), se halla el caudal  $Q$ .

$\Delta h$ (m)	$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
0.06	0.15
0.100	0.20
0.150	0.24
0.200	0.28
0.250	0.31
0.300	0.34
0.350	0.37
0.400	0.39
0.450	0.42
0.500	0.44
0.550	0.46
0.600	0.48

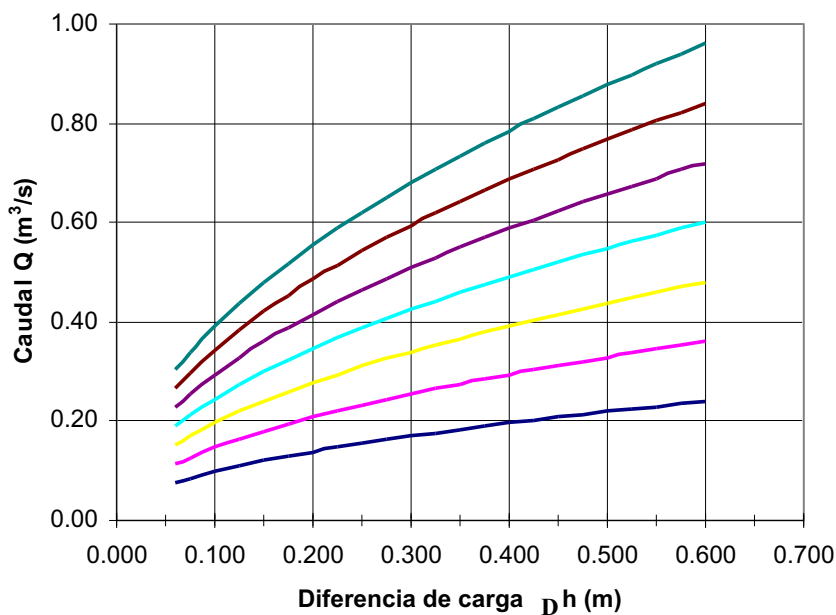
**Tabla N° 4.15:** Calculo del Caudal en Función de la Carga  $h$ , para una Compuerta con Abertura de 1.0 m x 0.20 m,  $C_d = 0.7$  y  $Q = 0.14 \times (2g h)^{0.5}$

- d) La Tabla N° 4.15 puede ser representada en forma gráfica (ver Figura N° 4.38), que permite la lectura directa del caudal cuando se conoce el valor de la diferencia de carga  $h$ .



**Figura N° 4.38:** Curva Caudal  $Q$  vs Diferencia de Carga  $h$ , para Compuerta con Abertura de 1.0 m x 0.20 m,  $C_d = 0.7$  y  $Q = 0.14 \times (2gh)^{0.5}$

En los pasos anteriores se describe la forma de obtener una curva calibrada de caudales  $Q$  vs diferencia de carga  $Dh$ , el cual se logró asumiendo una abertura de compuerta  $h_c=0.2$  m, así como diferentes valores de  $Dh$ . Pero para poder medir caudales se requiere contar con mas de una curva y así cubrir un rango amplio de operaciones de compuerta. En la Figura N° 4.39 se tiene una familia de curvas, que representa diferentes aberturas de compuertas  $h_c$ .



**Figura N° 4.39:** Curvas de Caudal vs Diferencia de Carga, para una Compuerta de ancho  $b = 1.0$  m, con Coeficiente  $C_d = 0.7$  y  $Q = 0.7 A (2gh)^{0.5}$ , donde  $h_c$  es la Abertura de la Compuerta, necesaria para Calcular A

**4.7.4 Calibración en Campo**

La calibración en campo se realiza de la siguiente manera:

- a) Se realiza el mantenimiento y la limpieza de la estructura, en especial sobre las compuertas y sus reglas.
- b) Con la ayuda de un correntómetro, ubicado aguas abajo de la toma de captación, se mide el caudal que pasa por la toma y al mismo tiempo con las lecturas sobre las reglas de la toma se calcula la diferencia de carga  $Dh$ ; este procedimiento permite obtener una relación del caudal  $Q$  en función de la diferencia de carga  $Dh$  y la abertura de la compuerta  $hc$ .
- c) Manteniendo la abertura de la compuerta del paso anterior, se ajusta la compuerta aguas abajo, con el fin de cambiar el nivel  $h_2$ , con este nuevo nivel se halla el nuevo  $\Delta h$  ( $h_1-h_2$ ); simultáneamente a esta operación de compuertas se mide con el correntómetro el caudal que pasa por la toma, obteniendo así un nuevo caudal para un  $Dh$  dado.
- d) Al realizar el paso c) repetidas veces, se construye una tabla de caudales  $Q$  vs diferencia de carga  $\Delta h$ , y luego se dibuja su curva de descarga.
- e) El paso d) se debe realizar al menos tres veces, los datos obtenidos se dibujan sobre un papel milimetrado y se obtiene una curva de ajuste que represente el promedio de las curvas dibujadas. Este procedimiento permite minimizar los errores de lectura en campo.
- f) En el desarrollo de la calibración de los limnómetros se detalla el procedimiento para la obtención de la curva de ajuste.

**4.7.5 Medición**

Operando la compuerta (abriendo o cerrando) se obtienen diferentes cargas, para cada una de las cuales se le conoce una cantidad fija de caudal. Para fijar un caudal se procede de la siguiente manera:

- Con la compuerta aguas arriba fijada en una abertura, la compuerta aguas abajo es ajustada. Se mide la diferencia de cargas en las reglas graduadas (ver  $Dh$  en la sección AA de la Figura N° 4.36, y recurriendo a la Tabla N° 4.16 se encuentra el caudal.

$\Delta h$ (m)	Abertura $hc$ (m)						
	0.10 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.15 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.20 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.25 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.30 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.35 Q (m <sup>3</sup> /s)	0.40 Q (m <sup>3</sup> /s)
0.060	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.27	0.30
0.075	0.08	0.13	0.17	0.21	0.25	0.30	0.34
0.100	0.10	0.15	0.20	0.25	0.29	0.34	0.39
0.125	0.11	0.16	0.22	0.27	0.33	0.38	0.44
0.150	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36	0.42	0.48
0.175	0.13	0.19	0.26	0.32	0.39	0.45	0.52
0.200	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.55
0.225	0.15	0.22	0.29	0.37	0.44	0.51	0.59
0.250	0.16	0.23	0.31	0.39	0.47	0.54	0.62
0.275	0.16	0.24	0.33	0.41	0.49	0.57	0.65
0.300	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68
0.325	0.18	0.27	0.35	0.44	0.53	0.62	0.71
0.350	0.18	0.28	0.37	0.46	0.55	0.64	0.73
0.375	0.19	0.28	0.38	0.47	0.57	0.66	0.76
0.400	0.20	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.78
0.425	0.20	0.30	0.40	0.51	0.61	0.71	0.81
0.450	0.21	0.31	0.42	0.52	0.62	0.73	0.83
0.475	0.21	0.32	0.43	0.53	0.64	0.75	0.85
0.500	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88
0.525	0.22	0.34	0.45	0.56	0.67	0.79	0.90
0.550	0.23	0.34	0.46	0.57	0.69	0.80	0.92
0.575	0.24	0.35	0.47	0.59	0.71	0.82	0.94
0.600	0.24	0.36	0.48	0.60	0.72	0.84	0.96

**Tabla N° 4.16:** Caudal  $Q$ , en Función de la Diferencia de Carga  $h$  y la Abertura de la Compuerta  $hc$ , para Compuerta de Ancho  $b = 1.0$  m,  $C_d = 0.7$  y  $Q = 0.7 A (2g h)^{0.5}$

- Si el caudal obtenido en el paso anterior no es el deseado, se procede a ajustar nuevamente la compuerta de aguas abajo, luego se mide la diferencia de carga  $Dh$  y recurriendo a la Tabla de caudales vs Cargas se determina el nuevo caudal; este proceso se repite hasta hallar el caudal deseado.
- En los pasos anteriores el caudal es obtenido de tablas, pero también es posible encontrar el caudal recurriendo a curvas (ver Figura N° 4.39).

A continuación se desarrolla un ejemplo de medición de caudales en estructuras de toma con orificio de carga constante.

### **Ejemplo**

Se pide encontrar el caudal que pasa por una compuerta de ancho  $b=1.0$  m, la cual tiene una abertura  $hc = 0.35$  m; en las reglas de la compuerta se ha medido  $h_1 = 0.72$  m y  $h_2 = 0.52$  m.

### **Desarrollo**

- a) Se encuentra la diferencia de carga  $Dh$ .

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 0.72 - 0.52 = 0.20 \text{ m}$$

- b) Con  $\Delta h=0.20$  m y  $hc=0.35$ m, se recurre a la Tabla N° 4.16 ó a la Figura N° 4.39 y se obtiene el caudal:  $Q=0.49 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## **4.8 SECCIONES DE CONTROL**

### **4.8.1 Introducción**

A continuación se presenta el método área pendiente para el cálculo aproximado de caudales en canales. El cálculo del caudal se realiza empleando la ecuación de Manning, pero para ello se requiere conocer:

- a) La pendiente del fondo del canal o de la línea de energía.
- b) El área de las secciones transversales del canal, así como su perímetro y radio hidráulico.
- c) El coeficiente de rugosidad de Manning.
- d) La ecuación de Manning se escribe:

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

Donde:

- Q : Caudal que circula por la sección, en  $\text{m}^3/\text{s}$ .  
n : Coeficiente de rugosidad de Manning.  
A : Área hidráulica en  $\text{m}^2$ .  
R : Radio hidráulico en m.  
S : Pendiente de energía del canal.

Para emplear este método el canal debe poseer: flujo uniforme, pendientes moderadas (flujo subcrítico, Froude  $\ll 0.8$ ), secciones geométricas muy bien definidas, fondo y taludes del canal con un solo material (de preferencia revestido), que el canal se encuentre en un tramo recto y que las condiciones arriba descritas no cambien en el canal en una longitud que no puede ser menor a 60 m.

Si se tiene cuidado de conservar las recomendaciones hechas arriba, queda garantizado que la pendiente de fondo del canal sea aproximadamente igual a la pendiente de energía del canal (condición deseada para el empleo de la ecuación de Manning).

#### 4.8.2 Descripción de la Estructura

Las mediciones por lo general se realizan sobre secciones trapezoidales o rectangulares, aunque no existe restricciones para el tipo de sección siempre y cuando respeten las especificaciones enunciadas en la introducción de este texto. Ver Figura N° 4.39.

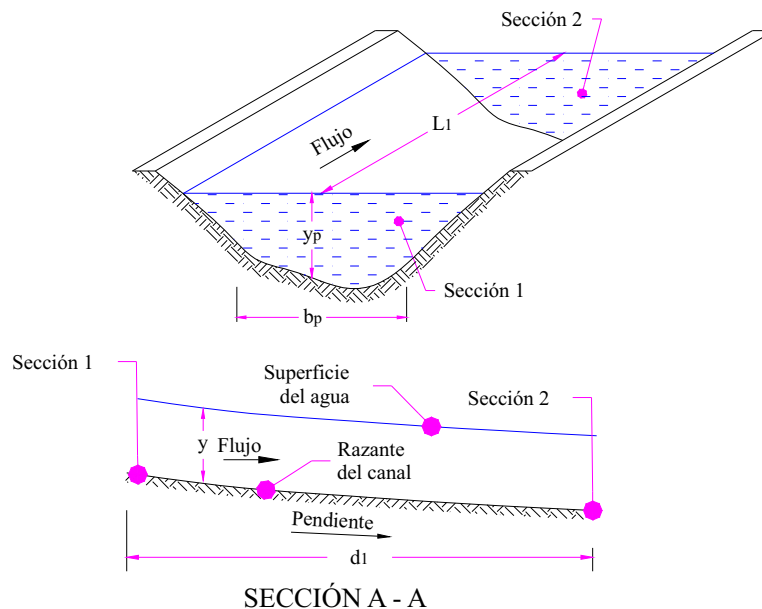


Figura N° 4.40: Sección y Perfil de Canal en Tierra

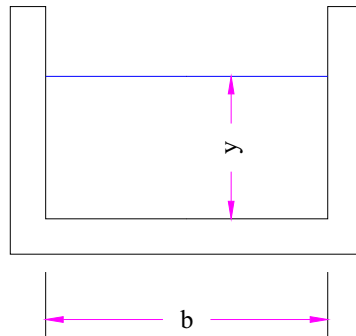
#### **Sección rectangular (canal revestido)**

La geometría de esta sección es muy simple (ver Figura N° 4.41) y sus características geométricas se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$A = b \times y, \quad P = b + 2 \times y, \quad R = A / P$$

Donde:

- A : Área hidráulica de la sección en m<sup>2</sup>.
- P : Perímetro mojado de la sección en m.
- R : Radio hidráulico de la sección en m.
- b : Ancho de la sección del canal en m.
- y : Tirante hidráulico del canal en m.



**Figura N° 4.41:** Elementos Hidráulicos y Geométricos de la Sección Rectangular de un Canal

**Sección trapezoidal (canal revestido)**

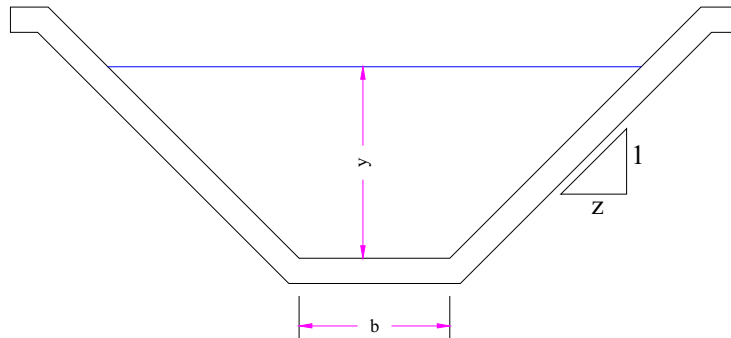
La sección trapezoidal es una de las secciones mas usadas en la hidráulica de canales (ver Figura N° 4.42). La geometría de ésta sección se calcula según las ecuaciones:

$$A = y \times (b + zy) , P = b + 2 \times y \times (1 + z^2)^{0.5} , R = A / P$$

Donde:

- A : Área hidráulica de la sección en m<sup>2</sup>.
- P : Perímetro mojado de la sección en m.
- R : Radio hidráulico de la sección en m.
- y : Tirante hidráulico de la sección en m.
- z : Talud del canal.

91



**Figura N° 4.42:** Elementos Hidráulicos y Geométricos de un Canal con Sección Trapezoidal

Note que los valores del área (A), perímetro (P) y el radio hidráulico (R), son función del tirante (y), que es un dato medido directamente en la sección del canal y para cada valor del tirante (y) se tiene un caudal dado. Las recomendaciones para medir el tirante sobre la sección del canal son las mismas que se especifican para la lectura en los limnímetros.

A diferencia del limnómetro que es calibrado empleando un correntómetro, en nuestro caso la calibración de la curva caudal - elevaciones se hace analíticamente empleando la ecuación de Manning.

### **4.8.3 Calibración**

Para realizar la calibración se procede como sigue:

- a) Determinar la pendiente del canal, el cual se obtiene al dividir la diferencia de los niveles del agua (en un tramo) entre la longitud del tramo.
- b) Ubicar un punto dentro del tramo donde se midió la pendiente, para colocar una regla graduada, de no ser posible dibujar la regla sobre el talud del canal.
- c) Con la regla debidamente ubicada en una sección constante del canal, donde no existe variaciones de la geometría y la profundidad del agua es uniforme a lo largo del tramo seleccionado, se procede a tomar la lectura del nivel del agua.
- d) Conociendo la lectura del nivel del agua, se obtiene el área ( $A$ ), perímetro ( $P$ ) y radio hidráulico ( $R$ ). El caudal se obtiene al reemplazar los valores de  $A$ ,  $P$  y  $R$  en la ecuación de Manning. Este procedimiento se realiza repetidas veces obteniendo para cada nivel de agua su caudal correspondiente. Finalmente se grafica una curva de elevaciones - caudales tal como se ve en la Figura N° 4.43.
- e) Los valores recomendados de coeficiente de Manning según tipo de material se obtienen de la Tabla N° 4.17.

**Tabla N° 4.17:** Valores del Coeficiente de Manning ( $N$ ) según el Tipo de Material de Construcción del Canal

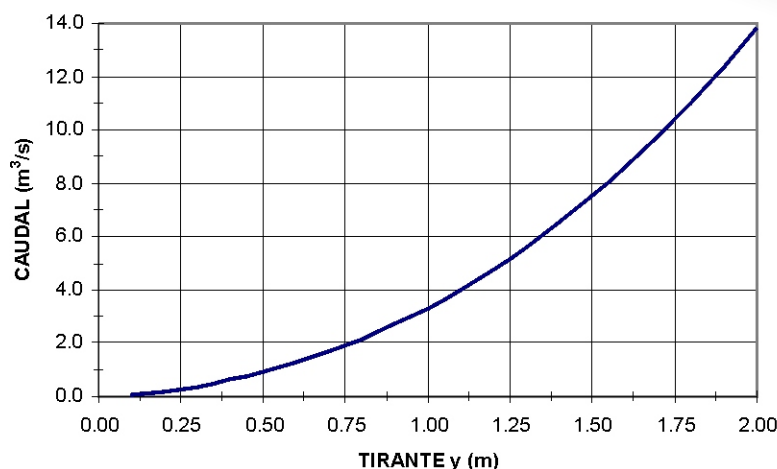
<b>Material</b>	<b>Coeficiente de Manning (<math>n</math>)</b>
Superficie de cemento pulido	0.012
Canales revestidos con concreto	0.014
Superficie de mampostería con cemento	0.020
Acueductos semicirculares, metálicos, lisos	0.012
Acueductos semicirculares, metálicos corrugados	0.025
Canales en tierra, alineados y uniformes	0.025
Canales en roca, lisos y uniformes	0.033
Corrientes naturales limpias, bordos rectos, sin hendeduras ni charcos profundos	0.030
Corrientes naturales igual al anterior, pero con algo de hierba y piedra	0.035
Corrientes naturales igual al anterior, pero menos profundas, con secciones pedregosas	0.055
Ríos con tramos lentos, cauce con hierba o con charcos profundos	0.070

- f) Hay que tener cuidado cuando el nivel del agua cambia periódicamente, es necesario que las mediciones se hagan cuando el nivel del agua sea estable.

### **4.8.4 Medición**

La medición de caudales en canales empleando el método de área pendiente es como sigue:

- a) En la regla graduada que se encuentra sobre el canal o pintado sobre una de sus paredes, se lee la altura del nivel del agua (tirante  $y$ ).
- b) Conociendo el valor del tirante se acude a una curva de elevaciones - caudales (ver Figura N° 4.42) que previamente ha sido calibrada y allí para la altura medida se obtiene su caudal.



**Figura N° 4.43:** Curva Elevaciones Caudales en un Canal Trapezoidal Obtenido a partir de la Ecuación de Manning

Este método para medición de caudales es sencillo, pero se tiene que considerar que el caudal obtenido es un valor aproximado, y depende de que se mantengan las condiciones que se tuvieron al momento de calibrar. Es posible que con el tiempo cambie la rugosidad o la geometría del canal, variables importantes para el cálculo del caudal, es por eso que se recomienda realizar monitoreos periódicos del estado de la sección de control y en caso de variación, volver a calibrar la sección.

## **4.9 AFORO CON FLOTADOR**

### **4.9.1 Introducción**

El aforo con flotador es un recurso muy empleado para medir caudales en canales y cauces, cuando no se puede emplear otro dispositivo de medición. Este método consiste en calcular la velocidad de la corriente empleando un flotador y luego conociendo el área de la sección hidráulica se obtiene el caudal. Es importante saber que la exactitud de este método es la menos precisa comparada con otros métodos.

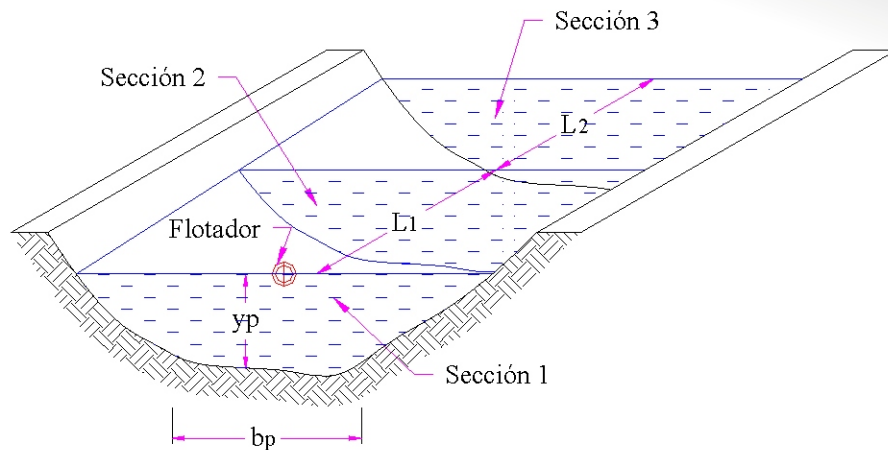
La aproximación de las mediciones de caudales, empleando el método del flotador está limitada por muchos factores, tales como: corrientes no uniformes, el valor de la velocidad media es aproximada, fuerzas del viento que mueven al flotador y los errores de toma de datos en el campo (medición del tiempo).

Como flotador se pueden emplear objetos, que no sean muy ligeros y el viento los mueva, pero tampoco que sean muy pesados y alteren la medición de la velocidad. El material del flotador puede ser madera, corcho, plástico, etc.

### **4.9.2 Descripción del Método**

El método consiste en determinar la velocidad media de la corriente, siempre que el tramo del canal escogido para el aforo, sea recto y su sección transversal sea homogénea a lo largo de todo el tramo, ver Figura N° 4.43. También se debe procurar que en el canal no se presenten ondas ni remolinos, es preferible que las mediciones se realicen en días en que no existan mucho viento, para evitar que el flotador cambie de dirección por dicho efecto.





**Figura N° 4.44:**Tramo de Canal en Tierra con Flotador

El cálculo del caudal empleando flotador se fundamenta en la ecuación de continuidad, que se escribe:

$$Q = V \times A \quad \dots(4-28)$$

Donde:

- Q : Caudal que pasa por la sección, (m<sup>3</sup>/s).
- V : Velocidad media en el canal, (m/s).
- A : Área hidráulica de la sección del canal, (m<sup>2</sup>).

La velocidad se obtiene de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{e}{t} \quad \dots(4-29)$$

Donde:

- e : Distancia que recorre el flotador en un tiempo t, (m).
- t : Tiempo que emplea el flotador en moverse un distancia e, (s).

La velocidad obtenida con el flotador, corresponde a la velocidad en la superficie de la corriente, pero para aplicar la ecuación (4-28) se requiere que la velocidad medida con el flotador sea transformada a velocidad media, lo que se logra empleando los coeficientes de corrección de la Tabla N° 4.18.

Profundidad media en el tramo de canal (m)	Coefficiente de corrección de velocidad
0.30	0.66
0.61	0.68
0.91	0.70
1.22	0.72
1.52	0.74
1.83	0.76
2.74	0.77
3.66	0.78
4.57	0.79
>6.10	0.80

**Tabla N° 4.18:** Coeficientes para Corregir la Velocidad Superficial de los Flotadores a Velocidades Medias en Canales

El método del flotador se emplea en los siguientes casos:

- Cuando no se cuenta con un correntómetro u otro instrumento de aforo.
- La excesiva velocidad del agua no permite el uso del correntómetro, ni ningún otro dispositivo medidor.
- La corriente en el canal presenta demasiados cuerpos extraños, que no hace posible el uso del correntómetro u otro medidor.
- Se pone en riesgo la vida del que efectúa el aforo.
- Se corre el riesgo de perder o dañar el correntómetro u instrumento de medición.

#### **4.9.3 Medición**

Para medir empleando el método del flotador se siguen los siguientes pasos:

- a) Se debe definir un tramo recto de canal, con sección homogénea y flujo uniforme, luego tomar medias de la longitud y de la geometría de la sección.
- b) Dividir el tramo seleccionado en tres sub-tramos como mínimo, siendo mejor que sean 5 sub-tramos, cada sub-tramo debe ser de igual longitud.
- c) Soltar el flotador aguas arriba de la primera sección, es decir arriba del inicio del primer tramo, cuando el flotador pase sobre la primera sección encender el cronometro y empezar a medir el tiempo conforme pase por las secciones de control.
- d) Conociendo el tiempo que se demora en recorrer cada sub-tramo y las distancias de cada sub-tramo, se procede a calcular la velocidad, para ello se emplea la ecuación (4-29).
- e) Las velocidades obtenidas en el paso anterior son velocidades sobre la superficie de la corriente, para obtener la velocidad media se multiplica dicha velocidad por un factor de corrección (ver Tabla N° 4.18).
- f) Obtenida la velocidad media en el paso e), y conociendo la geometría hidráulica del canal (área hidráulica), se determina el caudal empleando la ecuación (4-28).

95

### **4.10 MÉTODO VOLUMÉTRICO**

#### **4.10.1 Introducción**

El método volumétrico, es el método mas directo para aforar caudales, y se fundamenta en un principio muy sencillo, que es contabilizar el volumen de agua en un determinado tiempo. Este método solo sirve para medir caudales pequeños.

Una aplicación de mediciones volumétricas se da en el caso de mediciones de caudales en pozos, redes de tuberías o en canales pequeños, para tal fin se emplean contadores volumétricos y depósitos graduados o de volumen conocido.

#### **4.10.2 Descripción del Método**

Este método permite hallar el caudal de dos maneras; conociendo el volumen y el tiempo y, empleando contadores volumétricos.

### **Volumen tiempo**

Consiste en medir el tiempo en que se llena un recipiente de volumen conocido. El caudal se obtiene al dividir el volumen del recipiente entre el tiempo de llenado. Para calcular el caudal, empleando este método, se realiza lo siguiente:

- a) Se desvía la corriente que circula por un canal, hacia un estanque o recipiente de volumen conocido.
- b) Se calcula el tiempo que tarda en llenar el recipiente. Para dar mayor exactitud a la medición del tiempo, se recomienda emplear un cronómetro.
- c) Se calcula el caudal  $Q$  dividiendo el volumen medido en el tiempo de llenado del recipiente.

Para emplear este método, se debe considerar lo siguiente:

- Para caudales de hasta 4 l/s, usar un recipiente de 10 litros de capacidad.
- Para caudales de hasta 50 l/s, usar un recipiente de 200 litros de capacidad.
- En algunos casos los recipientes se llenan en pocos segundos, por lo que se recomienda que la medición del tiempo sea lo mas exacto posible.
- Repetir el aforo varias veces, permitirá una mejor precisión de los resultados.

### **Contadores volumétricos**

Son mayormente empleados cuando se trata de medir caudales en redes de tuberías o en plantas de bombeo. El caudal se obtiene directamente mediante el empleo de un dispositivo llamado contador volumétrico. Estos contadores están provistos de unas hélices o discos, en una sección de área conocida (sección de la tubería) y suelen tener un totalizador de volumen o un medidor de caudal instantáneo, en la Figura N° 4.44 se tiene una vista de un contador volumétrico, donde se leen directamente los volúmenes en un tiempo determinado, obteniéndose el caudal dividiendo el volumen medido en el tiempo escogido.



**Figura N° 4.44: Contador Volumétrico y de Caudal Instantáneo**

## **5.0 LA CALIBRACIÓN DENTRO DE LA GESTIÓN DEL AGUA**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Hasta aquí se ha desarrollado el tema de la calibración de los diferentes equipos y estructuras de medición, pero por ser una actividad programática dentro de la gestión de la operación y mantenimiento de los sistemas de riego, se requiere realizar la calibración en forma permanente para verificar del estado de funcionamiento de las estaciones o secciones de control como las estructuras de medición y a calibrarlas en su instalación o realizar la calibración de estaciones de medición nuevas.

La verificación de la calibración será realizada anualmente ya sea en forma parcial, seleccionando un grupo de estaciones de la red de medición que tienen susceptibilidad a cambios de características hidráulicas (secciones de control, por ejem.), o en todas las estaciones o estructuras de la red.

La calibración de verificación consiste en realizar los aforos con caudales máximos, medios y mínimos y calcular la discrepancia de aforos con la curva de calibración original, la discrepancia permitida entre curvas o aforos no ser mayor a 5%.

### **5.2 SISTEMA ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA**

#### **5.2.1 Establecimiento de Métodos y Formatos de Registro**

La información obtenida en la red a través de las estaciones de medición requiere el establecimiento de los métodos y formatos de registro, en este sentido a fin de que las labores a ejecutar tengan el éxito deseado, es necesario que la acción vaya anticipada de la planificación de las tareas a realizar. Esto significa entre otros aspectos, definir el objetivo de las acciones que se plantea ejecutar. Asimismo fijar las actividades y metas a alcanzar.

Para establecer las metas es conveniente la división del sistema en áreas de aforos de calibración, las cuales deberán ser marcadas en un plano y establecidas la responsabilidad del personal participante.

Determinados los sitios donde se efectuarán los aforos se definirán los métodos y tipo de formatos que nos permitan obtener con mayor exactitud los volúmenes que discurren por el sistema de riego en un momento determinado.

### **5.3 EJECUCIÓN DE AFOROS Y MEDICIONES**

Definida la localización de los puntos de control y el método de aforo a emplear se procede a la ejecución de las mediciones a través de los técnicos de la Junta y Comisiones de Regantes. Durante la aplicación de los métodos se tomarán en cuenta los errores que ya han sido detectados anteriormente a fin de evitar la repetición de los mismos y por ende el deshecho de la información por falta de consistencia.

Las mediciones deberán registrarse inmediatamente de efectuada la lectura correspondiente. Estas deberán hacerse siguiendo un orden prefijado. Debe existir absoluta claridad sobre quien y cuando registra, sobre quien y cuando procesa.

Los formatos ( N° 1 y, N° 2) para los aforos de calibración que se adjuntan son los comúnmente utilizados.

#### **5.4 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN**

Los datos levantados por los técnicos de la Junta y Comisiones de Regantes en los diferentes puntos de control utilizando los formatos de registro utilizados, son entregados según la frecuencia establecida al personal responsable de hacer las operaciones aritméticas necesarias para el cálculo de parámetros que nos permiten conocer como se comportan la fuente de abastecimiento y los canales principales del sistema de riego. La supervisión, verificación y aprobación de la información estará a cargo de la Gerencia Técnica de la Junta. En caso se cuente con un sistema automatizado de procesamiento de datos, la digitación de los registros a la base de datos estará a cargo del personal encargado del sistema de cómputo.

En muchas Juntas de Usuarios los datos que se toman en la estructura o estación según sea la frecuencia, se envían en los formatos establecidos a la oficina de operaciones, pudiendo ser estos: horarios, diarios, semanales, quincenales, mensuales y anuales. Con esta información se mantiene actualizado la base de datos, permitiendo a la vez hacer el seguimiento o monitoreo de las ocurrencias del sistema mayor de riego, determinación de eficiencias, pérdidas, estadística de la campaña agrícola, control de tarifas.

#### **5.5 ENTREGA DE LA INFORMACIÓN PARA SER UTILIZADA EN LAS RUTINAS DE OPERACIÓN**

La salida y distribución oportuna de la información procesada es enviada a la unidad de operación de la Junta de Usuarios y Comisiones de Regantes, para ser utilizadas como elementos de juicio para poder realizar los movimientos de las compuertas indispensables que nos aseguren una correcta operación del sistema de riego. Depende del justo manejo de estos datos para mantener un constante equilibrio y para que las diferentes partes de un sistema no se vean castigadas por excesos o deficiencia de agua y respondan a las necesidades de riego.

#### **5.6 DOCUMENTACIÓN Y ARCHIVO**

Se necesita concentrar y conservar toda la información, tanto de base de datos, como la procesada en cuadros, tablas, gráficos, y otros en archivos y sistemas de cómputo en un lugar apropiado, porque es importante a fin de tomar las decisiones adecuadas para la operación del sistema de riego.

El análisis y utilización de la información por ser usadas en otras rutinas de O&M, es de responsabilidad de la Gerencia Técnica y de los Dirigentes de Junta de Usuarios y Comisiones de regantes.

La Figura No 5.1 muestra la rutina de control hidrométrico, de la que es parte la calibración de estructuras de medición y se observa el flujo de la información hidrométrica (en este caso la calibración) para su utilización en el proceso de gestión del agua en las J.U. y CR..

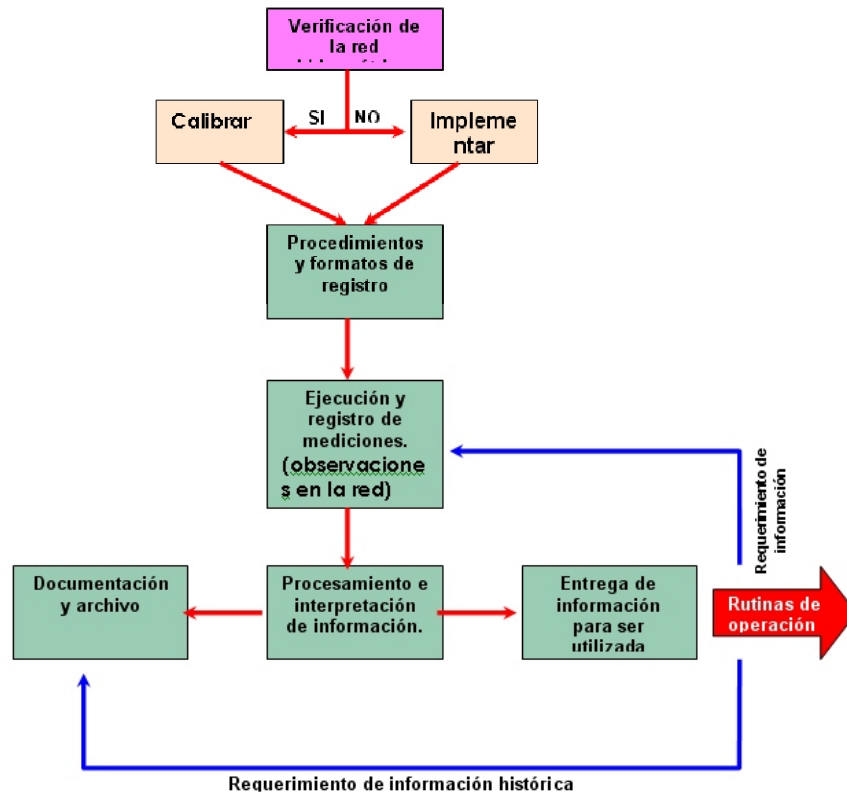


Gráfico 5.1: Rutina de Control Hidrométrico, Fuente: Manual de Hidrometría PES I

## 6.0 CARTILLAS DE CALIBRACIÓN

### 6.1 CARTILLA DE AFORO PARAMOLINETES

#### 6.1.1 Introducción

El caudal que pasa por una sección de un canal o un río, se obtiene de multiplicar la velocidad de la corriente, por el área hidráulica de la sección, el cual se expresa mediante la ecuación:

$$Q = VA \quad \dots(6-1)$$

Donde:

Q : Caudal que pasa por la sección de aforo, (m<sup>3</sup>/s).

V : Velocidad media de la corriente, (m/s).

A : Área de la sección hidráulica del canal o cauce, (m<sup>2</sup>).

### **6.1.2 Consideraciones Generales**

Para la sección hidráulica del canal, se debe considerar lo siguiente:

1. Debe ser estable, bien definida y no propensa a la erosión o sedimentación.
2. Se debe ubicar en un tramo recto, con una longitud suficientemente larga para garantizar que el flujo en el canal sea uniforme, libre de turbulencias y olas. En promedio la longitud del tramo puede variar entre 150 a 200 m.
3. El tramo escogido para la sección de control debe carecer de afluentes.
4. Las velocidades en el canal deben ser mayores a 0.10 m/s, o en todo caso guiarse de las especificaciones del fabricante.
5. El tramo escogido para el aforo, no debe estar ubicado cerca a estructuras u obstáculos que produzcan remansos o alteren el régimen del flujo.
6. El lugar escogido para el aforo debe ser de fácil acceso.

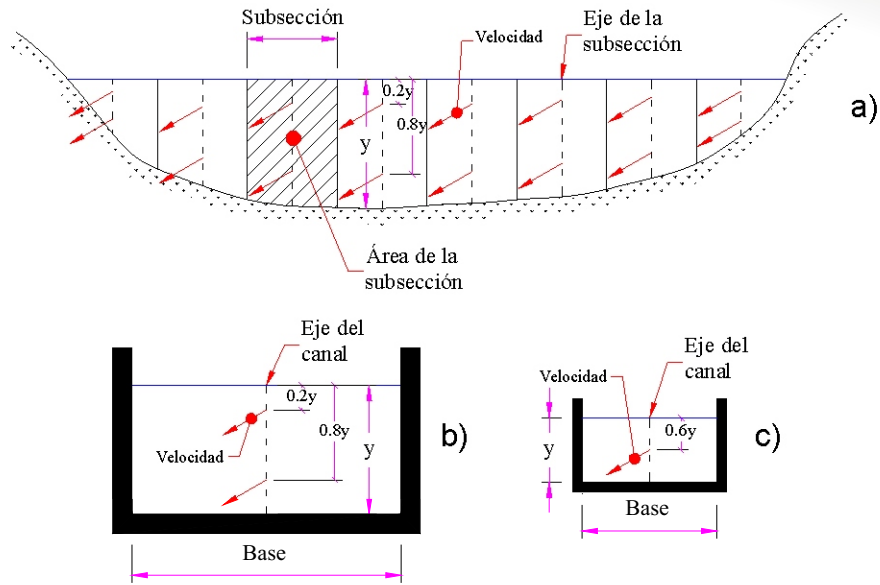
Para el aforo con molinete se debe considerar lo siguiente:

- a) Se deberá usar solamente molinetes calibrados.
- b) Es necesario calibrar los molinetes según la forma de sujeción (vara o cable).
- c) A los molinetes con cojinetes y cámara de aceite (tipo A.OTT), se le recomienda cambiar el aceite cada 4 horas de trabajo; cuando el aforo se realiza en agua turbia o donde existe mucho sedimento fino, el aceite se debe cambiarse frecuentemente.
- d) Emplear solo aceites recomendados por el fabricante del molinete, de no ser posible se debe usar un aceite ligero, sin residuos ácidos y sin componentes abrasivos.
- e) En cada aforo verificar el buen estado y funcionamiento del molinete y sus accesorios. Cuando el aforo es prolongado, se debe verificar cada cierto tiempo.
- f) Después de cada sesión de aforo es necesario revisar y limpiar todo el equipo.
- g) Cuando el molinete no se ha usado por largo tiempo, necesariamente tendrá que hacerse un mantenimiento.
- h) El molinete necesariamente tendrá que calibrarse cuando sufra deformaciones (desgaste de hélice) o alteraciones de cualquiera de sus componentes.

### **6.1.3 Aforo**

#### **6.1.3.1 Sección de Control**

Si la sección del canal es grande, tal como se ve en la Figura N° 6.1 a), es conveniente dividir la sección en subsecciones; por otro lado si la sección del canal es definida y no es muy grande (ver Figura N° 6.1 b) no se requiere ninguna división, y las mediciones se realizan al centro de la sección.



**Figura N° 6.1:** Sección transversal para aforo con molinete, a) sección irregular, b) sección regular (mediana a grande) y c) sección regular de canales pequeños.

El número de subsecciones varía según el ancho de la sección y de la irregularidad del fondo. Cuando la sección es muy ancha y el tirante es casi uniforme, no se requiere de muchas subsecciones. Caso contrario será necesario dividir la sección en muchas subsecciones para lo cual se tiene que considerar:

**101**

- La subsección no sea mayor a  $1/15$  ó  $1/20$  del ancho total de la sección y para casos prácticos usar la Tabla N° 6. 1.
- Para secciones extensas, el caudal que pasa por cada subsección no debe ser mayor al 10% del caudal total.
- Cuando las mediciones de velocidad se realiza en varios puntos de la vertical se debe cuidar que la diferencia de velocidades en la profundidad no sea mayor al 20% comparadas unas con otras.

Ancho de la sección (m)	Ancho de la subsección (m)
0.00 1.20	0,1
1.20 3.00	0,2
3.00 5.00	0,3
5.00 8.00	0,4
8.00 12.0	0,5
12.0 18.0	0,8
18.0 25.0	1,0
25.0 35.0	1,5
35.0 50.0	2,0
50.0 70.0	2,5
70.0 100.0	3,0
100 En adelante	4,0

**Tabla N° 6.1:** Ancho de la subsección en función del ancho del canal.



**6.1.3.2 Medición de Velocidades**

Una forma de medir las velocidades con un molinete, es tomando varias mediciones en el eje vertical, de esta forma se logra obtener un perfil de velocidades, cuya ventaja es, que permite obtener una velocidad media mas exacta. Para este procedimiento se considera:

- a) El molinete debe estar lo más cerca posible a la superficie, cuidando que la hélice se encuentre completamente sumergida. Del mismo modo el molinete debe estar lo más cerca posible del fondo, pero hay que cuidar que la hélice trabaje libremente, sin chocar con el suelo.
- b) Los puntos de medición intermedios sobre el eje vertical, deben ser mas seguidos cerca a la superficie y mas espaciados cuando se acerque al fondo.
- c) La cantidad necesaria de puntos de medición en el eje vertical se da en la Tabla N° 6.2.

**Tabla N° 6.2:** Puntos de medición sobre el eje vertical en función del tirante

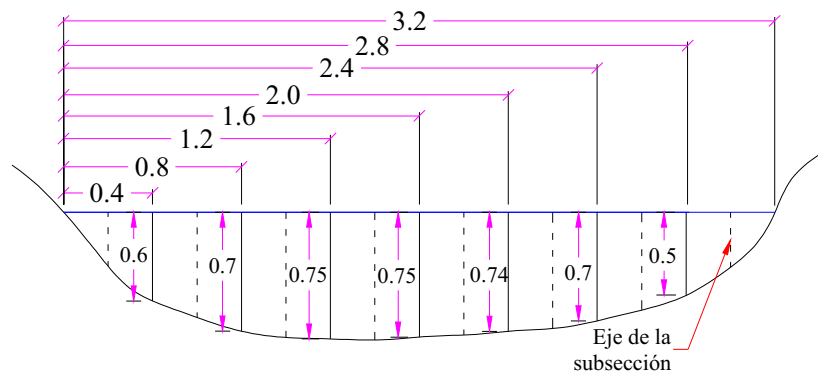
Tirante (m)	# de puntos de medición sobre la profundidad
Hasta 1.0	3 4
1.0 3.0	4 7
3.0 7.0	7 9
Más de 7.0	7 10

Cuando no es posible tomar varias mediciones sobre el eje vertical, las mediciones se realizan colocando el molinete en solo dos puntos específicos del eje vertical; se recomienda que las mediciones sean a una profundidad de 0,2 y 0,8 del tirante, contados a partir de la superficie del agua; la velocidad media se obtiene promediando las dos mediciones.

Cuando el canal es pequeño, solo se podrá tomar una medición (ver Figura N° 6.1 c), y estará ubicada a una profundidad de 0.6 el tirante, contado a partir de la superficie libre del agua.

**6.1.3.3 Desarrollo del Aforo**

Para aforos con molinete se propone el uso del Formato N°01, que esta preparado para realizar dos mediciones en el eje vertical y corresponde al esquema presentado en la Figura N° 6.2. El Formato N°01 tiene 12 columnas y a su vez esta dividido en dos partes; de la columna 1 al 5, se toman los datos de campo y de la columna 6 a la 13, se procesan los datos de la primera parte. En la Tabla N° 6.3 se describe la forma de llenar el Formato N°01.



**Figura N° 6.2:** Sección de control de un canal, dividido en 7 subsecciones, y con mediciones del tirante por cada subsección.

Col.	Título	Descripción
1	Distancia	Es la distancia de uno de los bordes del canal al eje de la subsección; ver la Figura N° 6.2.
2	Profundidad	Es la profundidad del agua en cada subsección y se ubica al centro de la subsección.
3	Profundidad de lectura	Es la profundidad de medida con el molinete; en este caso a 0.2y y 0.8y; donde y es la profundidad del agua en la subsección.
4	Revoluciones	Es el numero de revoluciones registrado por el contador del molinete. Tener en cuenta que en cada subseccion se realizan dos mediciones.
5	Tiempo	Es el tiempo que transcurre en contar el total de revoluciones.
6	N	N es la velocidad de rotación de la hélice, se calcula al dividir el numero de revoluciones entre el tiempo.
7	Punto	Es la velocidad en el punto donde se toma la medida; este valor se determina usando la ecuación de calibración del molinete, que es: $V = 0,2465N + 0,015$ , Para $N < 0,72$ $V = 0,2690N + 0,006$ , Para $N > 0,72$
8	Vertical	Es la velocidad media en la vertical, y se calcula con la expresión $(V_{0.2} + V_{0.8})/2$ . Esta es la velocidad que actúa sobre la subsección.
9	Ancho	Es el ancho de la subsección. Y es el resultado de dividir el ancho total en tramos iguales.
10	Profundidad media	Es la profundidad media de la subsección y representa la altura promedio asumiendo que la subsección es rectangular.
11	Área	Es el área que se obtiene de multiplicar el ancho de la subsección por la profundidad media.
12	Caudal	Se obtiene de multiplicar la velocidad media de la subsección obtenida en la columna 8 por el área de la subsección obtenida en la columna 11.

**Tabla N° 6.3:** Descripción del llenado del Formato N°01, para el aforo con correntometro

El caudal total se obtiene sumando los caudales de todas las subsecciones. A continuación se presenta un ejemplo, llenado con datos reales (Formato N° 01); en la Figura N° 6.2 se aprecia la disposición de las subsecciones así como las respectivas.

**Formato N°01**

**AFORO CON CORRENTÓMETRO**

**Junta De Usuarios:** \_\_\_\_\_  
**Comisión de Regantes:** \_\_\_\_\_  
**Nombre de Cauce (río, canal, etc.):** \_\_\_\_\_

Estación de Aforo: \_\_\_\_\_  
 Observador: \_\_\_\_\_ Hora: \_\_\_\_\_  
 Instrumento: OTT N° 12170 Hélice N° 1  
 $V \neq 0.2465N + 0.015$  si  $N < 0.72$   
 $V \neq 0.2590N + 0.006$  si  $N > 0.72$

OBSERVACIONES					CÁLCULOS								
1	2	3	4	5	6	7		8	9	10		11	12
Distancia (m)	Prof (cm)	Prof de lectura (cm)	Revol. (rev)	Tiempo (s)	N (rev/s)	Velocidad		Vertical (m/s)	Ancho (m)	Sección		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	
						Punto (m/s)				Prof. Media (m)	Área (m <sup>2</sup> )		
0.4	60	12	100	56	1.7857	0.468		0.477	0.4	0.3	0.12	0.0572	
		48	100	54	1.8519	0.486							
0.8	70	14	100	50	2.0000	0.524			0.4	0.65	0.26	0.134	
		56	100	52	1.9231	0.504							
1.2	75	15	100	44	2.2727	0.595		0.57	0.4	0.125	0.29	0.165	
		60	100	48	2.0833	0.546							
1.6	75	15	100	40	2.5000	0.659			0.4	0.15	0.3	0.185	
		60	100	45	2.2222	0.582		0.618					
2	74	14.8	100	43	2.3256	0.608			0.4	0.145	0.298	0.169	
		59.2	100	50	2.0000	0.524		0.566					
2.4	10	14	100	56	1.7857	0.468		0.422	0.4	0.12	0.288	0.122	
		56	100	10	1.4286	0.376							
2.8	0								0.4	0.35	0.14	0.000	
<b>CAUDAL TOTAL (m<sup>3</sup>/s)</b>												0.832	

Profundidad de lectura con el correntómetro 0.2 y 0.8 de la profundidad medida a partir de la superficie del agua.

## 6.2 CARTILLA PARA AFORO CON FLOTADOR

### 6.2.1 Introducción

El aforo con flotador, consiste en obtener el caudal que pasa por una sección de canal, empleando el método área velocidad, que se expresa como:

$$Q = VA \quad \dots(6-1)$$

Donde:

Q : Caudal que pasa por la sección de aforo, (m<sup>3</sup>/s).

V : Velocidad media de la corriente, (m/s).

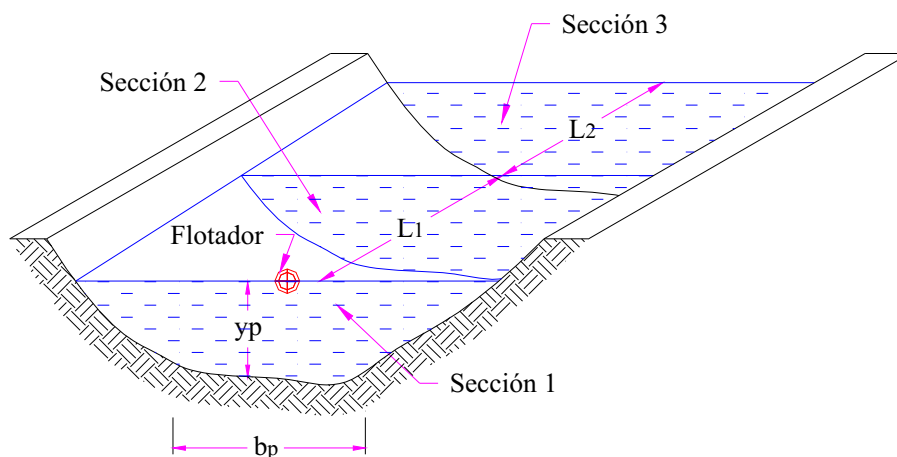
A : Área de la sección hidráulica del canal o cauce, (m<sup>2</sup>).

En la ecuación (6-1), la velocidad se obtiene con el método del flotador y el área de la sección hidráulica se obtiene de mediciones hechas en campo. El objeto empleado como flotador tiene que ser ligero y capaz de permanecer siempre en estado de flotación, el material del que esta hecho el flotador puede ser madera, corcho, plástico, etc.

### 6.2.2 Consideraciones generales

- El tramo del canal escogido para el aforo, debe ser recto y con sección transversal homogénea a lo largo de todo el tramo.
- Se debe escoger tramos de canal que no presenten flujo turbulento (remolinos) ni ondas.
- De preferencia las mediciones se deben realizar en días u horas en que no se presente mucho viento, para evitar que el flotador cambie de dirección por dicho efecto.

En la Figura N° 6.3 se aprecia el esquema de la sección de un canal que va hacer aforado empleando el método del flotador.



**FiguraN° 6.3:** Esquema de la sección de un canal que va hacer aforado con un flotador.

El cálculo de la velocidad empleando flotador se realiza empleando la ecuación:

$$V = e/t \quad \dots(6-2)$$

Donde:

e : Distancia que recorre el flotador en un tiempo t, (m).

t : Tiempo que emplea el flotador en moverse una distancia e, (s).

Como la velocidad del flotador corresponde a la superficie de la corriente, es necesario corregir dicha velocidad con el fin de transformarla a una velocidad media de la sección, dicha corrección se hace empleando la Tabla N° 6.4.

Profundidad media en el tramo de canal (m)	Coefficiente de corrección de velocidad
0.30	0.66
0.61	0.68
0.91	0.70
1.22	0.72
1.52	0.74
1.83	0.76
2.74	0.77
3.66	0.78
4.57	0.79
>6.10	0.80

**Tabla N° 6.4:** Coeficientes de corrección de velocidad superficial de los flotadores a velocidades medias en canales.

### 6.2.3 Aforo

Para aforar un canal empleando el método del flotador se debe usar el Formato N°02. A continuación se detalla como debe llenarse cada columna del Formato N°02.

- a) Definir un tramo de canal recto de 15 a 20 m de longitud, de sección homogénea y con flujo uniforme, tal como se indica en la Figura N° 6.3. El tramo seleccionado debe dividirse en dos subtramos de distancias iguales  $L_1$  y  $L_2$ .
- b) Soltar el flotador aguas arriba de la sección 1. Cuando el flotador pasa por la sección 1 iniciar el conteo del tiempo empleando un cronometro; al llegar el flotador a la sección 2 se toma la primera lectura del tiempo  $t_1$ , y cuando el flotador llega a la sección 3, se debe detener el conteo del tiempo (tiempo total), restando el tiempo total del tiempo  $t_1$  se obtiene el tiempo  $t_2$ .
- c) Calcular la velocidad del subtramo 1 ( $V_1$ ) y del subtramo 2 ( $V_2$ ), que se obtiene de dividir, las distancias de los subtramos ( $L_1$  y  $L_2$ ) entre los tiempos que transcurren en recorrer los respectivos subtramos ( $t_1$  y  $t_2$ ).
- d) Como las velocidades medidas en cada subtramo ( $V_1$  y  $V_2$ ) corresponden a las velocidades en la superficie de la corriente, éstas se deben multiplicar por el factor de corrección  $C$ , para obtener las velocidades medias de cada subtramo ( $V_{m1}$  y  $V_{m2}$ ); el coeficiente de corrección  $C$  se obtiene de la tabla N°01.

- e) Promediando las velocidades medias de los subtramos 1 y 2 ( $V_{m1}$  y  $V_{m2}$ ), se obtiene la velocidad promedio del canal ( $V_p$ ).
- f) Para calcular el área de la sección, se pueden emplear las formulas del area del cuadrado o del área del trapecio, para ello se requiere conocer el ancho de la base b, el talud z y el tirante y; cuando la sección es irregular, el área se calcula aproximando la sección irregular a una sección rectangular o trapezoidal.
- g) El caudal Q se obtiene de multiplicar la velocidad promedio ( $V_p$ ), por el área de la sección.
- h) Cuando el canal que se esta aforando posee una estructura de regulación aguas arriba de la sección de control, se puede obtener una tabla de elevaciones gastos siguiendo los pasos del 1 al 7, luego colocando una regla graduada podrá realizarse lecturas de caudales como si fuese una sección calibrada.

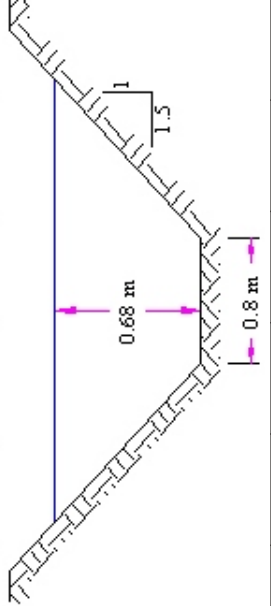
**Formato N° 02**

**AFORO CON FLOTADOR**

Junta de Usuarios:  
 Comisión de Regantes:  
 Nombre de Canal:  
 Estación de Aforo:  
 Observador:  
 Fecha:

Hora:

OBSERVACIONES										CÁLCULOS									
Medición N°	Distancias		Tiempo (s)			Velocidad					Área			Caudal					
	L1 (m)	L2 (m)	T1 (s)	Tt (s)	t2 (s)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	C	Vm1 (m/s)	Vm2 (m/s)	Vp (m/s)	b (m)	Z	y (m)	A (m <sup>2</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /s)			
1	5.0	5.0	4.22	8.42	4.20	1.18	1.19	0.61	0.7227	0.7262	0.7245	0.8	1.5	0.68	1.2376	0.897			



**Nota:**

Si el canal que se desea aforar, tiene un sistema de regulación de caudales aguas arriba, es entonces posible calibrar la sección. Para calibrar la sección se deben realizar mediciones con flotador tantas veces como se opere la estructura de regulación, lo anterior permitirá obtener una tabla de elevaciones y vs caudales Q; si graficamos y vs Q obtenemos una curva de elevaciones caudales. Finalmente se marca la sección con una regla graduada para medir los

### 6.3 CARTILLA PARA AFORO CON RBC

#### 6.3.1 INTRODUCCIÓN

El aforo de caudales empleando vertedores de cresta ancha (RBC), se puede realizar de forma analítica o con la ayuda de tablas, gráficos y hasta programas de computo; para ello se requiere conocer las características geométricas del aforador, así como la medida de la profundidad del agua en la regla aguas arriba del aforador. En la figura N° 01 se presenta el esquema de los aforadores RBC.

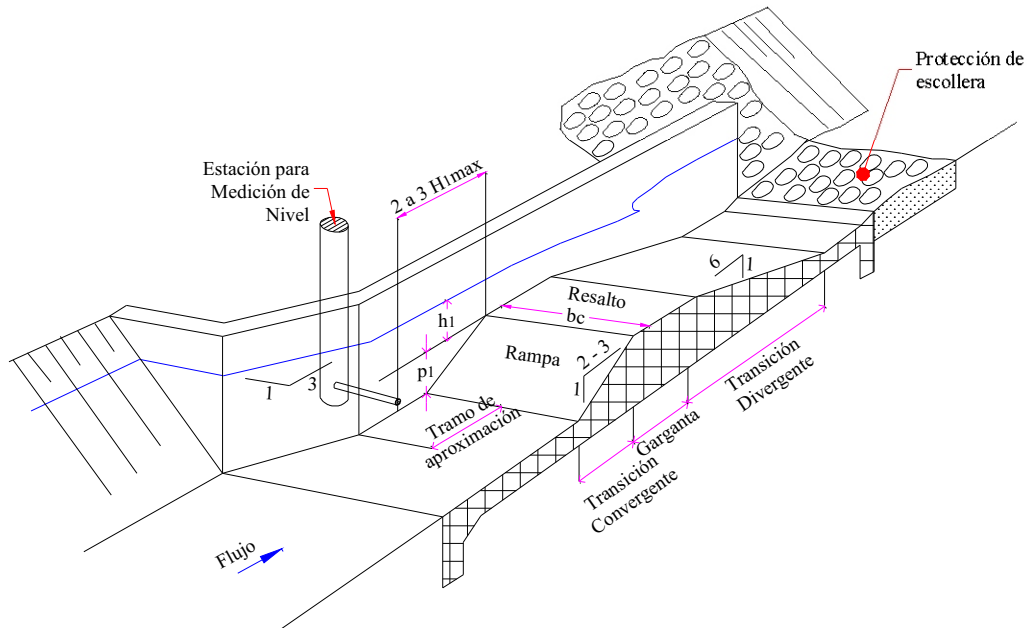


Figura N° 6.4: Sección Típica de un Aforador de Cresta ancha (RBC)

#### 6.3.2 CONSIDERACIONES GENERALES

- a) El aforador RBC, siempre debe funcionar bajo la condición de flujo libre, tal como se ve en la Fugura N° 6.5.

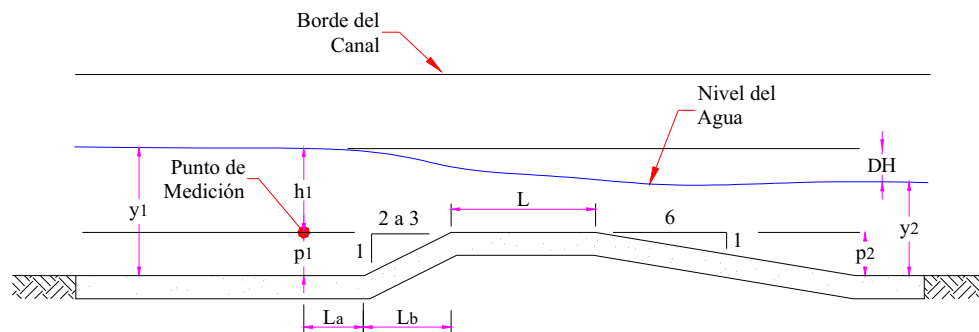


Figura N° 6.5: Esquema de Funcionamiento Hidráulico del Aforador RBC



- b) La distancia de la garganta  $L$ , debe de ser aproximadamente igual a 1.5 veces la carga máxima  $h_1$ , pero en cualquier otro caso se debe cumplir la relación,  $0.1h_1/L < 1.0$ , con lo anterior se garantiza una condición estable del coeficiente de descarga  $C_d$ .

**6.3.3 AFORO ANALÍTICO**

El aforo analítico se realiza empleando directamente la ecuación de descarga de los aforadores RBC, que se escribe:

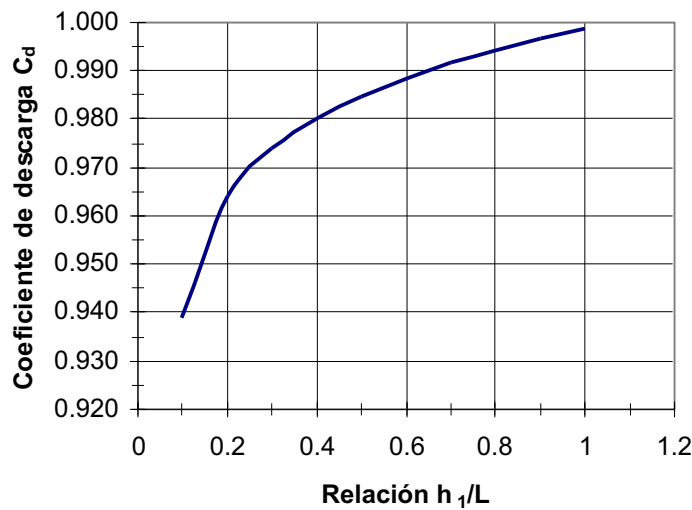
$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} (2/3g)^{0.5} b_c h_1^{1.5} \quad \dots(6-2)$$

Donde:

- $Q$  : Gasto que pasa por el aforador RBC, (m<sup>3</sup>/s)
- $C_d$  : Coeficiente de descarga.
- $C_v$  : Coeficiente de velocidad de aproximación.
- $b_c$  : Ancho de la cresta vertedora, (m).
- $h_1$  : Carga sobre la cresta, (m).

El coeficiente  $C_d$  se obtiene de la figura N°03 ó empleando la ecuación:

$$C_d = (h_1/L - 0.07)^{0.018} \quad \dots(6-3)$$



**Figura N° 6.6:** Valor de  $C_d$  en Función de  $h_1/L$

El coeficiente  $C_v$  se obtiene empleando la ecuación (6-4) y sirve para corregir el error provocado por despreciar la carga de velocidad de la sección de aforo.

$$C_v = 1 - \frac{V_1^2}{2gh_1}$$

- $a_1$  : Coeficiente de aforo
- $V_1$  : Velocidad en el canal, (m/s).
- $u$  : Exponente de  $h_1$  en la ecuación de gasto; se obtiene de la Tabla N° 6-5.

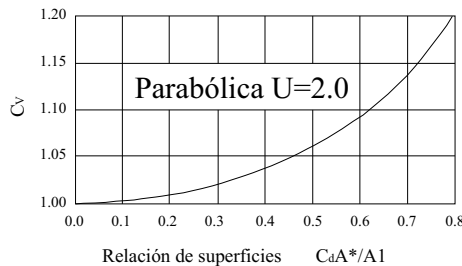
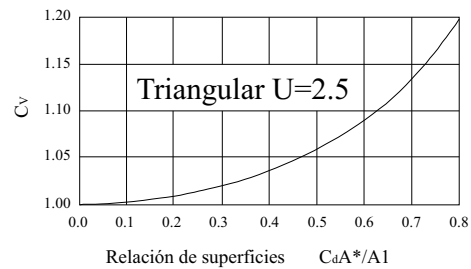
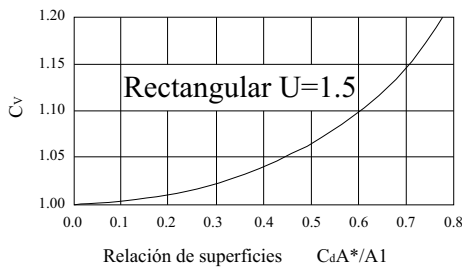
**Tabla N° 6.5:** Exponente  $u$  según el tipo de sección del aforador RBC

Tipo de sección	Coefficiente $u$
Rectangular	1.5
Triangular	2.5
Parabólica	2.0

El coeficiente  $C_v$  también puede ser obtenido de la Figura N° 6.6a, que representa la relación del coeficiente  $C_d$  con la expresión  $(a_1)^{0.5} C_d A^* / A_1$ , según sea el tipo de la sección (triangular, parabólica o rectangular). En la expresión anterior,  $A^*$  representa el área hidráulica en la sección de la garganta y  $A_1$  es el área hidráulica en el canal de llegada; para una sección rectangular se tiene que:

$$A^* = b_c h_1$$

$$A_1 = b_1 y_1$$



**Figura N° 6.6a:** Valores de  $C_v$  en Función de la Relación  $(a_1)^{0.5} C_d A^* / A_1$

A continuación, se describe un ejemplo de cálculo del caudal en forma analítica.

Suponiendo que se tiene un aforador RBC de sección rectangular, con las siguientes características hidráulicas y geométricas:

- $L = 0.4 \text{ m}$
- $b_c = 0.25 \text{ m}$
- $p_1 = 0.1 \text{ m}$
- $h_1 = 0.125 \text{ m}$
- $y_1 = 0.225 \text{ m}$
- $b_1 = 0.25 \text{ m}$

**Desarrollo**

- a) Conociendo la longitud de la garganta  $L$ , y el valor de  $h_1$ , se calcula la relación  $h_1/L$ .

$$h_1/L = 0.125/0.4 = 0.3125, \text{ cumple la relación } 0.1h_1/L < 1.0$$

- b) Entrando en la Figura N° 6.5 con  $h_1/L = 0.3125$ , o empleando la ecuación (6-3), se determina el valor del coeficiente de descarga  $C_d = 0.975$ .

- c) Empleando la ecuación (6-4) se puede obtener el valor del coeficiente de corrección por velocidad  $C_v$ ; pero en este caso aun no se conoce la velocidad del canal  $V_1$ , por lo que será necesario recurrir a la Figura N° 6.6, procediendo de la siguiente manera:

$$A^* = b_c h_1 = 0.25 \cdot 0.125 = 0.03125$$

$$A_1 = b_1 y_1 = 0.25 \cdot 0.225 = 0.05625$$

$$(a_1)^{0.5} C_d A^* / A_1 = 1.04^{0.5} \cdot 0.975 \cdot 0.03125 / 0.05625 = 0.5524$$

De la Figura N° 6.6, entrando con  $(a_1)^{0.5} C_d A^* / A_1 = 0.55$ ; se obtiene  $C_v = 1.075$ .

- d) Conociendo los valores de  $C_d$ ,  $C_v$ ,  $b_c$  y  $h_1$ , se determina el caudal empleando la ecuación (6-2):

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} (2/3g)^{0.5} b_c h_1^{1.5}$$
$$0.975 \cdot 1.075 \cdot \frac{2}{3} (2/3 \cdot 9.81)^{0.5} \cdot 0.25 \cdot 0.125^{1.5} = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

**6.3.4 AFORO EMPLEANDO TABLAS**

Si se cuenta con tablas calibradas, el aforo de caudales en los RBC se explica mediante el siguiente ejemplo.

Determinar el caudal  $Q$  que pasa por un aforador RBC con las siguientes características hidráulicas y geométricas:

$$L = 0.4 \text{ m}$$

$$b_c = 0.25 \text{ m}$$

$$p_1 = 0.1 \text{ m}$$

$$h_1 = 0.125 \text{ m}$$

**Desarrollo**

- a) Conociendo el valor de  $L$  y  $h_1$ , se calcula la relación  $h_1/L$ .
- b)  $h_1/L = 0.125/0.4 = 0.3125$ , cumple la relación  $0.1 h_1/L < 1.0$ .
- c) En la Tabla N° 6.6 se tienen los caudales  $Q$  en función de la carga  $h_1$ , los cuales han sido obtenidos de un proceso de calibración previo.

$h_1$ (m)	$y_1$ (m)	$h_1/L$	Cd	$(a_1)^{0.5} C_d A^*/A_1$	Cv	Q (m <sup>3</sup> /s)
0.050	0.150	0.125	0.949	0.32	1.03	0.005
0.075	0.175	0.1875	0.962	0.42	1.04	0.009
0.100	0.200	0.25	0.970	0.49	1.06	0.014
0.125	0.225	0.3125	0.975	0.55	1.075	0.020
0.150	0.250	0.375	0.979	0.60	1.10	0.027
0.175	0.275	0.4375	0.982	0.64	1.13	0.035
0.200	0.300	0.5	0.985	0.67	1.14	0.043
0.225	0.325	0.5625	0.987	0.70	1.15	0.052
0.250	0.350	0.625	0.989	0.72	1.16	0.061
0.275	0.375	0.6875	0.991	0.74	1.17	0.071
0.300	0.400	0.75	0.993	0.76	1.18	0.082

**Tabla N° 6.6:** Cálculo de los Caudales Q en Función de la Carga  $h_1$ , para un aforador RBC con  $L=0.4$  m,  $b_c=0.25$  m,  $p_1=0.1$  m; con Canal Rectangular de Llegada con  $b_1=0.25$ m.

- d) Con el valor de  $h_1$  medido en la regla del aforador, se ingresa a la Tabla N° 6.6 y se obtiene el caudal  $Q=0.02$  m<sup>3</sup>/s.

### 6.3.5 AFORO EMPLEANDO GRÁFICOS

Si el aforador RBC cuenta con un gráfico de cargas  $h_1$  vs caudales Q, la forma de obtener el caudal Q se describe con el siguiente ejemplo.

- 113** Determinar el caudal Q que pasa por un aforador RBC con las siguientes características hidráulicas y geométricas:

$$L = 0.4 \text{ m}$$

$$b_c = 0.25 \text{ m}$$

$$p_1 = 0.1 \text{ m}$$

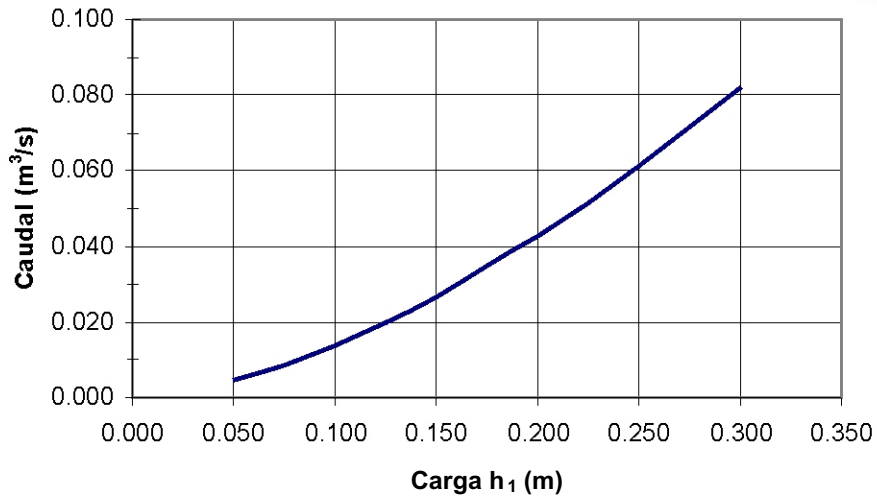
$$h_1 = 0.125 \text{ m}$$

#### Desarrollo

- a) Conociendo el valor de L y  $h_1$  se calcula la relación  $h_1/L$  y se verifica que se cumpla la condición  $0.1 < h_1/L < 1.0$ .

$$h_1/L = 0.125/0.4 = 0.3125, \text{ si cumple}$$

- b) En la Figura N° 6.7 se tiene la curva calibrada del aforador RBC en mención.



**Figura N° 6.7:** Curva de Cargas  $h_1$  vs Caudales  $Q$ , para un aforador RBC con  $L = 0.4$  m,  $b_c = 0.25$  m,  $p_1 = 0.1$  m; con Canal Rectangular de Llegada  $b_1 = 0.25$  m.

- c) Con el valor de  $h_1 = 0.125$  m, se recurre a la curva de Cargas  $h_1$  vs caudales  $Q$  Figura N° 6.7, entramos en el eje de las cargas  $h_1$ , se intercepta la curva y proyectándola sobre el eje de los caudales  $Q$ , se obtiene que  $Q = 0.02$  m<sup>3</sup>/s.

## 6.4 CARTILLA PARA CALIBRACIÓN DE COMPUERTAS

### 6.4.1 INTRODUCCIÓN

Las compuertas además de ser estructuras de control también se les puede aprovechar para medir los gastos que pasan a través de ella, para lo cual se emplea el principio de descarga en orificio. En la Figura N° 6.8 se presenta el esquema de las estructuras de compuerta.

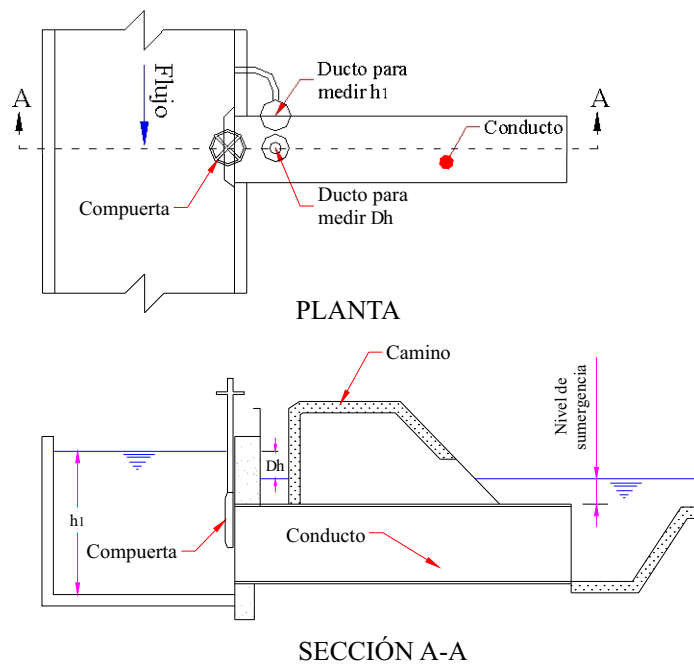
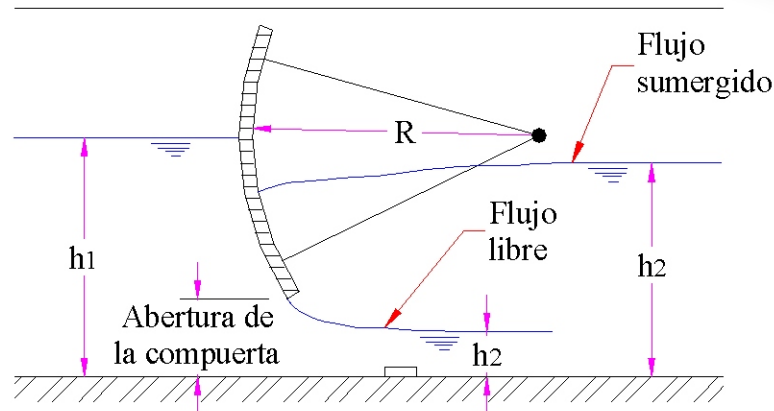


Figura N° 6.8: Esquema de una Toma con Compuerta Calibrada.

La calibración de compuertas consiste en obtener una curva o una tabla que nos permita obtener el caudal, conociendo sólo el valor de la carga  $h$  que se produce sobre la compuerta.

Las compuertas pueden funcionar de dos formas: (a) como flujo sumergido y (b) como flujo libre, poseyendo cada cual, sus propias curvas y tablas de diferencia de cargas  $Dh$  vs caudales  $Q$ . En la Figura N° 6.9 se presenta el esquema del funcionamiento de las compuertas radiales, que como esquema es igual para las compuertas convencionales.



**Figura N° 6.9:** Esquema del Funcionamiento de una Compuerta Radial.

#### 6.4.2 CONSIDERACIONES GENERALES

- La compuerta se debe encontrar operando correctamente, lo que supone que se deben realizar mantenimientos periódicos sobre la compuerta y sus accesorios, incluso sobre la regla graduada.
- La sección del canal próxima a la compuerta debe ser geoméricamente uniforme, en todo caso debe encontrarse limpia de malezas y de cualquier elemento perturbador del flujo, tanto aguas arriba como aguas abajo de la compuerta.
- Las compuertas se pueden calibrar analíticamente o en campo, pero se debe tener en cuenta la forma de cómo funcionan, es decir a flujo libre o a flujo sumergido.

**116**

#### 6.4.3 CALIBRACIÓN ANALÍTICA

##### 6.4.3.1 FLUJO SUMERGIDO

Una compuerta funciona sumergida, cuando aguas abajo de la compuerta el nivel del agua sobrepasa el nivel del orificio de apertura de la compuerta, es decir existe sumergencia. La condición descrita arriba se le conoce como descarga en orificio sumergido, donde el gasto es función directa de la pérdida de carga  $Dh$ ; la ecuación que describe la descarga en orificio sumergido se escribe:

$$Q = C_d \times A (gAh)^{0.5} \quad \dots(6-5)$$

Donde:

- $Q$  : Gasto que pasa por la compuerta, ( $m^3/s$ ).
- $C_d$  : Coeficiente de descarga.
- $A$  : Área de la abertura de la compuerta, ( $m^2$ ).
- $g$  : Aceleración de la gravedad,  $9.81 m/s^2$ .
- $\Delta h$  : Diferencia de carga, (m),  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

Diversos autores recomiendan que el coeficiente de descarga  $C_d$  sea tomado igual a 0.62; con este valor reemplazado en la ecuación (6-5), el caudal  $Q$  queda solo en función de la diferencia de carga  $\Delta h$  y del área del orificio generado por la abertura de la compuerta. A continuación, se describe mediante un ejemplo, los pasos a seguir para calibrar analíticamente una compuerta.

Se pide calibrar un compuerta rectangular, con las siguientes características hidráulicas y geométricas:

$bc$  (ancho de la base de la compuerta) = 1.0 m

$hc$  (Abertura de la compuerta) = 0.15 m

**Desarrollo**

- a) Conociendo la abertura de la compuerta  $hc$  y el ancho de la compuerta  $bc$ , se calcula el área de la sección de descarga  $A$ .

$$A = bc \ hc = 1.0 \cdot 0.15 = 0.15 \text{ m}^2$$

- b) Reemplazando los valores de  $A$  y  $C_d$  en la ecuación (6-5) se determina la ecuación del caudal  $Q$  que pasa por la compuerta.

$$Q = C_d A (g Dh)^{0.5} = 0.62 \cdot 0.15 (2 \cdot 9.81 Dh)^{0.5} = 0.412 Dh^{0.5}$$

$$Q = 0.412 Dh^{0.5}$$

- c) Para una abertura de compuerta  $hc = 0.15$  m, se asumen diferentes valores de diferencia de carga  $\Delta h$  (ver Tabla N° 6.7), que no es otra cosa que la diferencia de niveles de superficie del agua a la entrada y salida de la compuerta ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ).

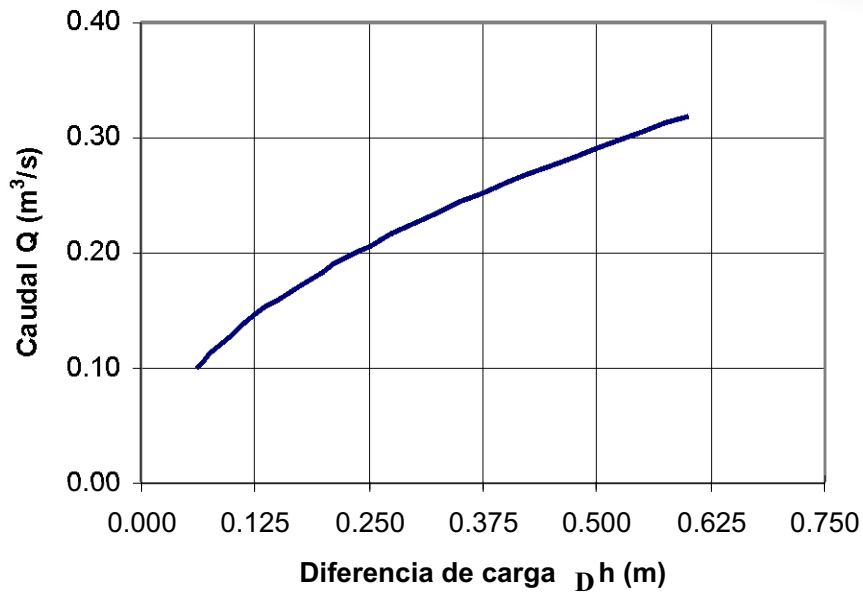
- 117** d) Para los valores de  $\Delta h$  asumidos en el paso b), se obtienen sus respectivos caudales, empleando la ecuación  $Q = 0.412 Dh^{0.5}$ , los resultados se observan en la Tabla N° 6.7.

$\Delta h$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
0.060	0.10
0.100	0.13
0.150	0.16
0.200	0.18
0.250	0.21
0.300	0.23
0.350	0.24
0.400	0.26
0.450	0.28
0.500	0.29
0.550	0.31
0.600	0.32

**Tabla N° 6.7:** Gastos en Función de Diferencias de Carga  $Dh$ , para una Compuerta con  $bc=1.0$  m,  $hc=0.15$  m,  $A=0.15$  m<sup>2</sup> y  $Q=0.412Dh^{0.5}$ .

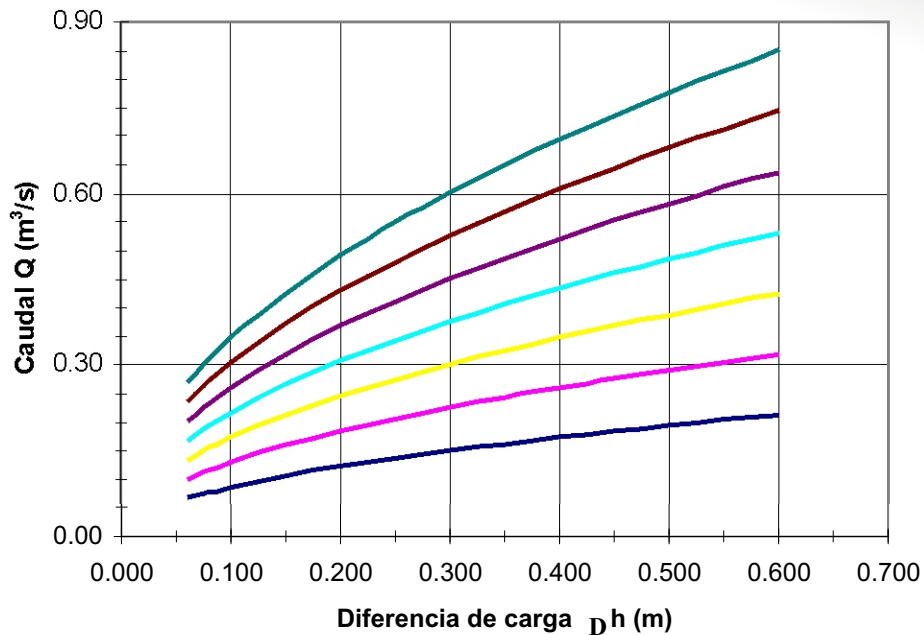
- e) La Tabla N° 6.7, permite determinar el caudal  $Q$  en función de la diferencia de carga  $\Delta h$ , es decir conociendo el valor de  $h$  y para la abertura de compuerta dada se puede obtener el caudal. La Tabla N° 6.7 se puede representar gráficamente tal como se ve en la Figura N° 6.10, a partir de la cual se puede obtener el caudal en función de la diferencia de carga  $h$ .





**Figura N°6.10:** Grafico de Caudal  $Q$  vs Diferencia de Carga  $Dh$ , para Compuerta de  $A = 1.0 \cdot 0.15 \text{ m}^2$ , con Abertura  $hc = 0.15 \text{ m}$  y  $Q = 0.412 Dh^{0.5}$ .

- f) En los pasos anteriores se describe la forma de construir una tabla y una curva de caudales  $Q$  vs diferencia de carga  $\Delta h$ , pero la curva y tabla obtenidas sólo sirven para una abertura de compuerta,  $hc = 0.15 \text{ m}$ . En la práctica se presentan muchas condiciones de operación de compuerta y se hace necesario contar con una familia de curvas en lugar de sólo una, para cubrir un rango más amplio de situaciones de operación. Para obtener una familia de curvas, de caudales  $Q$  vs  $\Delta h$ , se siguen los pasos descritos anteriormente, dibujando todas las curvas sobre un mismo gráfico. En la Figura N° 6.11 se presenta la familia de curvas que representa los caudales  $Q$  vs  $\Delta h$ , que a su vez son función de la abertura de la compuerta  $hc$ .



**Figura N° 6.11:** Curvas de Caudal  $Q$  vs Diferencia de Carga  $Dh$ , para una Compuerta de Ancho  $b=1.0m$ , Coeficiente de Descarga  $C_d=0.62$  y Diferentes Valores de Abertura de Compuerta  $h_c$ .

### 6.4.3.2 FLUJO LIBRE

La calibración analítica de una compuerta que funciona como flujo libre es complicada y poco práctica, por lo que se recomienda que, para estos casos, la calibración se realice en campo con la ayuda de un correntómetro.

### 6.4.4 CALIBRACIÓN EN CAMPO

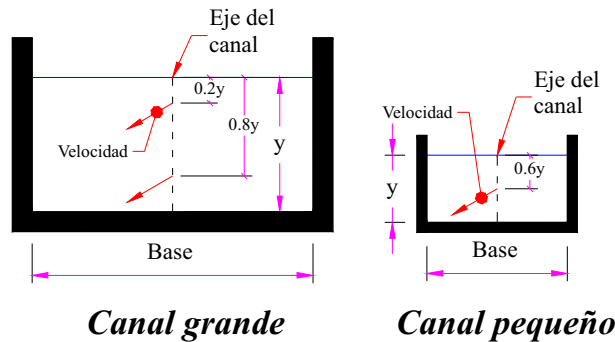
#### 6.4.4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

- Asegurarse que la zona de trabajo se encuentre en condiciones para realizar la calibración, es decir que no exista riesgos para la vida o la salud de los operadores.
- Tener preparado todos los equipos necesarios para llevar a cabo la calibración, tal como: correntómetro, libreta de apuntes, winchas, herramientas para el desbroce de malezas, cuerdas, etc.
- Cerciorarse que el correntómetro esté operando correctamente, así como conocer los límites de operación del aparato, con el fin de que las mediciones sean confiables.
- Verificar que las reglas graduadas estén debidamente instaladas, en un lugar firme y que las graduaciones sean legibles.

#### 6.4.4.2 FLUJO SUMERGIDO

La calibración en campo de compuertas (rectangulares y radiales) que funcionan a flujo sumergido, se realiza empleando un correntómetro, procediendo de la siguiente manera:

- a) La calibración se inicia abriendo la compuerta a una determinada altura, luego se toman las medidas de la abertura de la compuerta  $hc$ ; así como las medidas de la profundidad del agua antes y después de la compuerta  $h_1$  y  $h_2$ , para calcular la diferencia de carga  $Dh=h_1-h_2$ .
- b) Simultáneamente al paso anterior se realiza la medición del caudal que pasa por el canal, mediante el empleo de un molinete. El aforo con molinete se encuentra debidamente explicado en el ítem 6.1, aquí solo se hace referencia al procedimiento de una manera general. A continuación se describe la forma de aforar con molinete en canales.
  - Para aforo en canales, el molinete debe ser colocado al centro del canal, y la lectura de velocidades se realiza a una profundidad de  $0.2y$  y  $0.8y$  cuando el tirante es grande, caso contrario (tirantes pequeños) la velocidad se mide a una profundidad de  $0.6y$ . En la Figura N° 6.12 se presenta el esquema del aforo con molinete en canales.



**Figura N° 6.12: Aforo con Molinete en Canales de Sección Homogénea**

- Las velocidades y el caudal se obtienen completando la siguiente Tabla.

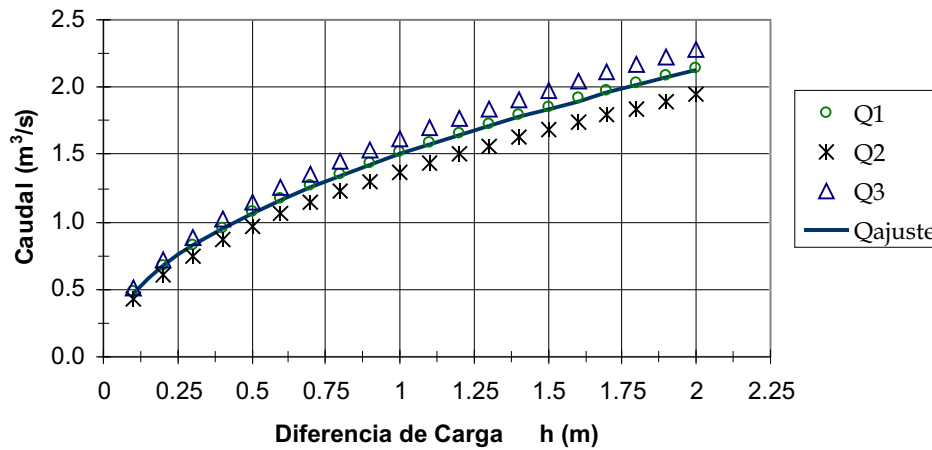
**Tabla N° 6.8: Formato para Aforo con Molinete en Canales de Sección Homogénea**

Canal : \_\_\_\_\_ Instrumento: OTT N° 12170 Hélice N° 1  
 Observador : \_\_\_\_\_  $V= 0.2465N + 0.015$  si  $N < 0.72$   
 Fecha : \_\_\_\_\_ Hora : \_\_\_\_\_  $V= 0.2590N + 0.006$  si  $N > 0.72$  (\*)

MEDICIONES			CÁLCULOS						
1	2	3	4 = 2/3	5 (*)	6	7	8	9	10 = 6*9
Prof lectu (m)	Revol. (rev)	Tiempo (s)	N (rev/s)	Velocidad (m/s)		Sección			Caudal (m³/s)
				$V_{0.2y}$ $V_{0.8y}$	Media Vertical	Ancho (m)	Tirante (m)	Área (m²)	
0.2y					$(V_{0.2y} + V_{0.8y})/2$				
0.8y									

- En el cuadro anterior la velocidad se obtiene de emplear la ecuación (\*), el cual corresponde al molinete OTT N° 12170, otros molinetes tienen su propia ecuación de velocidad.

- c) Conociendo la abertura de la compuerta, así como la diferencia de carga  $Dh$  y habiendo obtenido el caudal que pasa por la compuerta, se registra el dato en un tabla (ver Tabla N° 6.7).
- d) Manteniendo la abertura de la compuerta, repetir los pasos anteriores, de esta forma se obtienen una serie de datos de diferencia de carga  $Dh$  con su correspondiente caudal (aforado con molinete). Los datos obtenidos se pueden graficar obteniendo así la curva de caudales  $Q$  vs  $Dh$ , para una abertura de compuerta (ver en la Figura N° 6.13).
- e) Como la posibilidad de cometer errores al medir en campo son siempre altas, se procede a realizar la calibración de la compuerta tal como se describe en los pasos del 1 al 5, en por lo menos tres veces; luego graficando todas las curvas sobre un misma escala se obtiene una curva de ajuste que representa el promedio de las otras curvas. Realizando este proceso se logra reducir los errores de medición en campo.



**Figura N° 6.13:** Curva de Elevaciones - Caudales Ajustada, para Compuertas Calibradas.

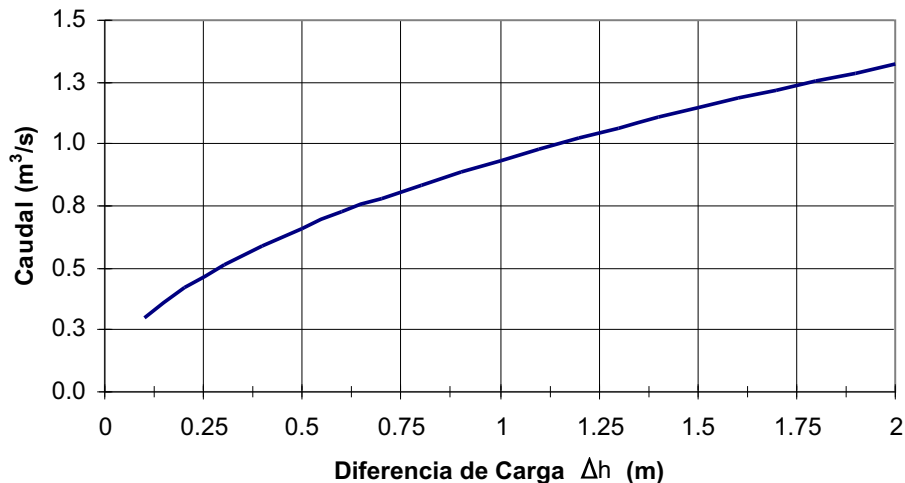
- f) Para cubrir un rango amplio de operaciones de compuertas, es necesario obtener mas curvas de calibración como las descritas aquí, considerando diferentes aberturas de compuerta. Lo anterior permitirá obtener una familia de curvas, que relacionan el caudal  $Q$  con la diferencia de carga  $Dh$ , en función de la abertura de la compuerta  $hc$ , (ver Figura N° 6.11).

La calibración en campo de compuertas que funcionan a flujo sumergido, como el descrito aquí, es literalmente aplicable, cuando es posible tener un sinnúmero de valores de  $Dh$  para una misma abertura de compuerta, caso típico de los partidores, por que cuando se calibra una compuerta la otra se puede operar haciendo variar las diferencias de carga  $Dh$ . En otras circunstancias los pasos descritos arriba son poco aplicables, salvo el caso, en que se cuente con una carga constante aguas arriba de la compuerta, lo que llevaría a construir una curva de abertura de compuerta  $hc$  vs caudales  $Q$ .

### 6.4.4.3 FLUJO LIBRE

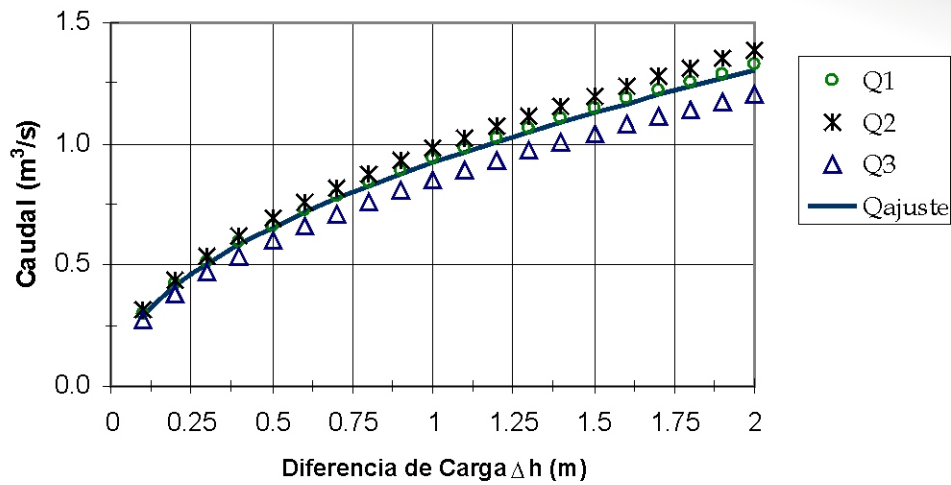
La calibración en campo de compuertas que funcionan a flujo libre, es similar al descrito en las compuertas que funcionan a flujo sumergido. La diferencia entre los dos tipos de funcionamiento está en los caudales que descargan, siendo mayor cuando la descarga es libre, debido a que el coeficiente  $C_d$  es mayor; así por ejemplo para una misma abertura de compuerta y un mismo valor de  $Dh$  el caudal será mayor cuando el flujo es libre. A continuación se describe el procedimiento de calibración en campo para compuertas que funcionan a flujo libre.

- Para una determinada abertura de compuerta  $hc$ , se toman las medidas de la profundidad del agua antes y después de la compuerta  $h_1$  y  $h_2$ , luego se calcula la diferencia de carga  $Dh = h_1 - h_2$ .
- Inmediatamente después de medir las cargas  $h_1$  y  $h_2$ , aguas abajo de la compuerta, se afora el caudal empleando un molinete. Los procedimientos de aforo se explican en el punto 6.1 (cartilla de aforo con molinetes) y se tienen mas detalles en el desarrollo de la calibración de compuertas que funcionan sumergidas.
- Hasta aquí se ha obtenido el caudal que pasa por una compuerta que funciona a flujo libre habiendo medido también la diferencia de carga  $Dh$ , estos resultados pueden acomodarse en una tabla (ver Tabla N° 6.7).
- Repitiendo los pasos anteriores se obtiene una serie de datos que relaciona el caudal  $Q$  (aforado con molinete) con la diferencia de carga  $Dh$ , estos datos se grafican y se obtiene una curva de caudales  $Q$  vs  $Dh$  (ver Figura N° 6.14).



**Figura N° 6.14:** Curva Elevaciones - Caudales para Compuertas Radiales.

- La curva de la Figura N° 6.14 puede contener algunos errores de medición producidos en campo, para disminuir estos errores se recomienda volver a calibrar dos veces más y dibujar las curvas de calibración sobre una misma escala, y construir un curva de ajuste que represente el promedio de las curvas calibradas; ver Figura N° 6.15.



**Figura N° 6.15:** Curva Elevaciones - Caudales Ajustada, Compuerta Radial.

- f) Como se vio en el caso de la calibración analítica, en la práctica se produce un sinnúmero de operaciones de compuertas; para cumplir con cubrir un rango amplio, se procede a realizar los pasos arriba descritos para diferentes aberturas de compuertas.

Los pasos descritos aquí para calibrar compuertas, solo son válidos cuando es posible tener un sinnúmero de valores de diferencias de carga  $h$ , para una misma abertura de compuerta, lo que solo se cumple en el caso de partidores, para otras condiciones esta labor de calibración se hace tediosa e impráctica, siendo lo más recomendado calibrarlas analíticamente.