



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL AFORO EN CAUSES NATURALES  
EMPLEANDO : MEDIDOR DE FLUJO ELECTROMAGNÉTICO,  
MOLINETE Y VERTEDOR**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**RIVERA CUEVAS, CITLALLI**

ASESOR: ROMERO CASTRO, IGNACIO

MÉXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

119



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/106/00

Señor  
CITLALLI RIVERA CUEVAS  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. IGNACIO ROMERO CASTRO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL AFORO EN CAUCES NATURALES EMPLEANDO:  
MEDIDOR DE FLUJO ELECTROMAGNÉTICO, MOLINETE Y VERTEDOR"**

- INTRODUCCIÓN -
- I. CONCEPTOS BÁSICOS
- II. DISEÑO DEL EXPERIMENTO
- III. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS
- IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES
- V. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 25 de mayo de 2001.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

295846

---

*Mira hacia adelante  
o te retrasarás*

*Benjamin Franklin*

---

---

*A:*

*La persona que ha sido un ejemplo de fortaleza y ha estado conmigo siempre, tanto en mis éxitos como fracasos, a ti, mamá. Gracias por apoyarme y alentarme en uno más de mis sueños.*

*Mis adoradas hermanas Quetzalli y Tonantzin. Gracias por su amor, amistad, alegría y paciencia. Siempre incondicionales conmigo.*

*Mi abuelita Bárbara, con quien compartí toda mi infancia. Siempre serás parte de mis triunfos.*

*Mi tío Oscar, gracias por el apoyo que me has brindado.*

---

---

*Paco, aquí está la segunda parte de nuestra tesis. Hemos vencido uno más de los obstáculos. Gracias por todo el apoyo que me has brindado y sobre todo gracias por tu amor.*

*Un gran amigo y excelente director de Tesis: Ignacio. Gracias por guiarme y transmitirme tus conocimientos, pero sobre todo por tu amistad y tus palabras de aliento.*

*A todos mis maestros, gracias por sus conocimientos y por la formación que me dieron. Sin ustedes no hubiera sido posible este logro. Gracias por ser quienes son.*

*La mejor y más querida escuela: Universidad Nacional Autónoma de México. Siempre estarás en mi corazón y estaré orgullosa de ser egresada tuya.*

*México, D.F., mayo 2001.*

---

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS</b>	<b>1</b>
1.1. Aspectos Generales	1
1.1.1. Características generales del flujo en un canal	1
1.1.2. Secciones de control	2
1.1.3. Distribución de velocidades en la sección de un cauce	2
1.1.4. Curva de gastos	4
1.1.5. Estación de aforo	5
1.2. Descripción general de los métodos de aforo	6
1.2.1. Métodos de Sección-Control	6
1.2.2. Métodos de Sección Velocidad	15
1.2.3. Medidor de Flujo Electromagnético	19
1.2.4. Métodos químico e isótopos radioactivos	19
1.2.5. Métodos alternativos	23
1.3. Aplicabilidad de los métodos	26
<b>CAPÍTULO II: DISEÑO DEL EXPERIMENTO</b>	<b>27</b>
2.1. Descripción física del modelo de cauce natural	28
2.2. Características del tramo de aforo	30
2.3. Descripción de los métodos	32
2.3.1. Vertedor triangular de pared delgada	32
2.3.2. Molinete	36
2.3.3. Electromagnético	41

<b>CAPÍTULO III: APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1. Batimetría de la sección de aforo	47
3.2. Vertedor triangular de pared delgada	49
3.3. Molinete	51
3.3.1. Calibración	51
3.3.2. Cálculo de la curva de gastos	53
3.4. Medidor electromagnético	57
3.4.1. Calibración	57
3.4.2. Cálculo de la curva de gastos	57
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES</b>	<b>61</b>
4.1. Errores y recomendaciones de medición	61
4.2. Análisis comparativo de las curvas elevaciones gastos	66
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>74</b>



## INTRODUCCIÓN

---

Una labor importante de la Ingeniería Civil es agilizar y optimizar la administración de los recursos hidráulicos; dicha tarea involucra actividades de distinta naturaleza y ámbito, iniciándose en aquellas encaminadas a adquirir un mejor conocimiento de la ocurrencia del agua, en las diversas fases del ciclo hidrológico.

El ingeniero que se ocupa de proyectar, construir o supervisar el funcionamiento de obras hidráulicas, requiere, sin excepción, de estudios hidrométricos para la selección del evento de diseño necesario.

Los resultados son en su mayoría, estimaciones, con aproximación limitada en muchos casos e inclusive burda en algunos otros.

En la fase de planeación y diseño, el análisis se dirige básicamente a fijar la capacidad y seguridad de estructuras hidráulicas, es ahí donde resulta indispensable determinar los volúmenes y gastos que se desean almacenar, controlar o conducir.

También en la operación efectiva de estructuras hidráulicas, especialmente en la generación de energía eléctrica y control de avenidas, se requiere frecuentemente de la obtención de hidrogramas de entrada.

Para determinar los volúmenes, gastos e hidrogramas; resulta necesario realizar aforos a la corriente o las corrientes en estudio. En México, los métodos empleados para aforar una corriente se basan principalmente en el uso de vertedores, flotadores, medidores Parshall, molinete, etc. Sin embargo, existen otros métodos alternativos con los que es posible aforar una corriente como son: el empleo de trazadores, medidor acústico y electromagnético.

Sin embargo, estos métodos alternativos aún se encuentran en la etapa de experimentación y su uso todavía está limitado en la práctica. Es por ello mi interés en hacer una recopilación de información a cerca de ellos.

Por otra parte, gracias a que el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería, cuenta con un medidor de flujo electromagnético, resultó factible, llevar a cabo, un proceso de experimentación, con el objeto de comprobar la alta precisión y funcionalidad de éste medidor. Pretendo lograr con ello, la difusión de las características de éste y por ende la extensión de su uso.

El objetivo principal es comparar los resultados obtenidos con el medidor electromagnético, con los dos métodos de aforo más empleados actualmente en la práctica profesional: vertedor y molinete.

El presente trabajo lleva por título: "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL AFORO EN CAUCES NATURALES EMPLEANDO: MEDIDOR DE FLUJO ELECTROMAGNÉTICO MOLINETE Y VERTEDOR", está dividido en cuatro capítulos, cada uno con un objetivo en particular; los cuáles describo a continuación:

Capítulo I, titulado "Conceptos Básicos" tiene por objeto exponer la terminología y todos aquellos conceptos teóricos que considero necesarios para la total comprensión del desarrollo y la aplicación de los diversos métodos de aforo aplicados en el estudio. En la primera parte de éste se enuncian aspectos generales. En la segunda, se encuentra una descripción general de todos los métodos de aforo existentes en la actualidad, incluyendo los convencionales y los alternativos. Finalmente en la tercera parte se presenta una tabla de aplicabilidad de los métodos.

Capítulo II, titulado "Diseño del Experimento" tiene por objeto el establecimiento de las características, consideraciones y dimensionamiento de la estructura para la aplicación de los tres métodos de aforo empleados. En la primera parte se describe físicamente el modelo de cauce natural y el tramo de aforo. La segunda comprende la descripción y procedimiento de aforo con cada método (Vertedor Triangular de Pared Delgada, Micromolinete y Medidor de Flujo Electromagnético), fórmulas y tablas que se emplearon para la medición y obtención de resultados.

Capítulo III, titulado "Aplicación de los Métodos", el cual tiene por objeto, aforar el gasto del cauce natural, aplicando los métodos seleccionados. En la primera parte se presentan: la batimetría de la sección de aforo empleada, la calibración de los dispositivos que lo requirieron y los valores obtenidos para cada una de las variables que intervienen en cada método. En la segunda parte se presentan las tablas y curvas de elevaciones-gastos que corresponden a cada uno.

Capítulo IV, titulado "Análisis de Resultados y Recomendaciones" en el cual se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos con cada uno de los métodos. Dicho análisis contiene un enfoque estadístico y práctico. Finalmente con base en el análisis de las curvas de elevaciones-gastos, se determina la congruencia, precisión y confiabilidad de los tres métodos aplicados en el modelo de cauce.

Finalmente, con base en el proceso de experimentación realizado, se llega a la parte más importante del trabajo, las Conclusiones, las cuales tienen por objeto, sintetizar lo más importante y aportar recomendaciones y observaciones, que sean de utilidad a todo aquel que desee conocer los métodos de aforo existentes o bien requiera de aforar una corriente.

---

**CAPÍTULO I****CONCEPTOS BÁSICOS.**

El objetivo de este capítulo, es exponer la terminología y todos aquellos conceptos teóricos necesarios para la total comprensión del desarrollo y la aplicación de los diversos métodos de aforo en cauces naturales; así como la obtención, manipulación, presentación e interpretación de resultados; con el fin de proporcionar criterios y recomendaciones para la selección del método adecuado, con base en la importancia y aplicación de los resultados.

**1.1. ASPECTOS GENERALES.**

La medición de flujo se utiliza para dos propósitos fundamentales, contabilidad y control, éste es un tema que ha generado trabajos intensos de investigación, continuamente se desarrollan nuevos métodos para realizar la medición del flujo en cauces naturales, es por ello el interés en difundir éstos equipos y métodos de aforo que se han desarrollado con los avances tecnológicos y que sin embargo su aplicación no se ha extendido en las áreas de interés.

Es importante iniciar este trabajo definiendo algunos conceptos básicos para finalmente llegar a la parte medular de éste, que es el Aforo en Cauces Naturales.

**1.1.1. Características generales del flujo en un canal.**

El flujo de un fluido en un canal y por ende en el caso de un cauce natural, se caracteriza por la exposición de una superficie libre a la presión atmosférica.

Los problemas relacionados con el flujo en canales representan una alta proporción del trabajo del ingeniero hidráulico y la aparente simplicidad resultante de la superficie libre es irreal debido al incremento en la complejidad de dicho flujo en comparación con el de un conducto a presión. El agua que fluye en un canal se ve afectado por todas las fuerzas que intervienen en el flujo dentro de un tubo, con la adición de las fuerzas de gravedad y de tensión superficial que son la consecuencia directa de la superficie libre. En realidad la superficie libre se debe considerar como una interfase entre dos fluidos, el superior un gas usualmente estacionario (o en movimiento) y el inferior un líquido en movimiento. Las fuerzas de gravedad y tensión superficial resisten cualquier fuerza tendiente a distorsionar esa interfase, la cual se debe tener presente y aceptar que nosotros como ingenieros ejerceremos sólo un control parcial. Por ello, se tienen que reconocer e incluir todas las variables que intervengan en nuestro estudio o proyecto, de tal forma que los resultados obtenidos sean lo más real posible.

De acuerdo con su origen un canal puede ser natural a artificial . Dentro de los primeros se incluyen todos los cursos de agua que existen en forma natural sobre la tierra, tales como: arroyos, ríos, etcétera. Dentro de los canales artificiales se incluyen todos los construidos por el hombre, como canales de navegación, canales de riego, obras de excedencia, etc.

A el canal que se construye con una sección transversal y pendiente de plantilla constante, se le denomina canal prismático. De no satisfacerse estas condiciones, el canal es no prismático, como es el caso de los canales naturales.

En canales naturales y artificiales, se presenta una nueva dificultad cuando el escurrimiento se relaciona con el transporte de sedimentos; es decir, cuando el río, en su recorrido de las montañas al valle, lleva consigo cuerpos sólidos más o menos grandes como arcilla, limos, arena, grava, hojas troncos y hasta grandes piedras, lo cual modifica constantemente la forma de las fronteras sólidas; esto dificulta una definición exacta de la rugosidad de la pared. Este estudio es tan complejo que merece consideraciones especiales, las cuáles quedan fuera del alcance de este trabajo. En este caso, la estructura de cauce natural donde se realizaron las mediciones, no cambió lo forma de su frontera, durante el tiempo en estudio.

### **1.1.2. Sección de control.**

En Hidráulica, una sección de control de una corriente es aquella en donde la energía específica del escurrimiento es mínima y se tiene una relación única entre el tirante y el gasto. Como se sabe dicha energía está asociada con el tirante crítico, por lo que se tendrá una sección de control donde se presente dicho tirante. Esto ocurre cuando existe levantamiento en el fondo del cauce, estrechamiento en la sección, o una combinación de ambos. La sección de control puede ser natural o bien artificial; un ejemplo de ésta última puede ser la conocida como sección vertedora o vertedor.

### **1.1.3. Distribución de velocidades en la sección de un cauce.**

La presencia de la superficie libre y de curvas a lo largo del cauce natural, la forma de la sección, la rugosidad superficial, el gasto y la acción de corrientes secundarias en el plano de la sección transversal afectan la distribución de velocidades en la sección del río. Dicha distribución se presenta con base a las curvas que unen puntos de igual velocidad. Estas curvas normalmente se interpolan a partir de los datos obtenidos de mediciones con molinetes.

Como se observa en la figura 1.1. la velocidad mínima ocurre en la proximidad de la pared y existe un incremento de la velocidad hacia la superficie

libre. El punto de la velocidad máxima queda ligeramente debajo de la superficie libre, lo cual se debe al movimiento circulatorio inducido por la proximidad de los lados. Es por ello que en canales anchos y de poco tirante, la velocidad máxima se localiza al nivel de la superficie libre.

En la figura 1.1. se puede observar que la zona donde ocurre la máxima velocidad, se localiza prácticamente sobre la vertical de mayor profundidad y a una distancia de 0.05 a 0.25 del tirante desde la superficie libre hacia abajo.

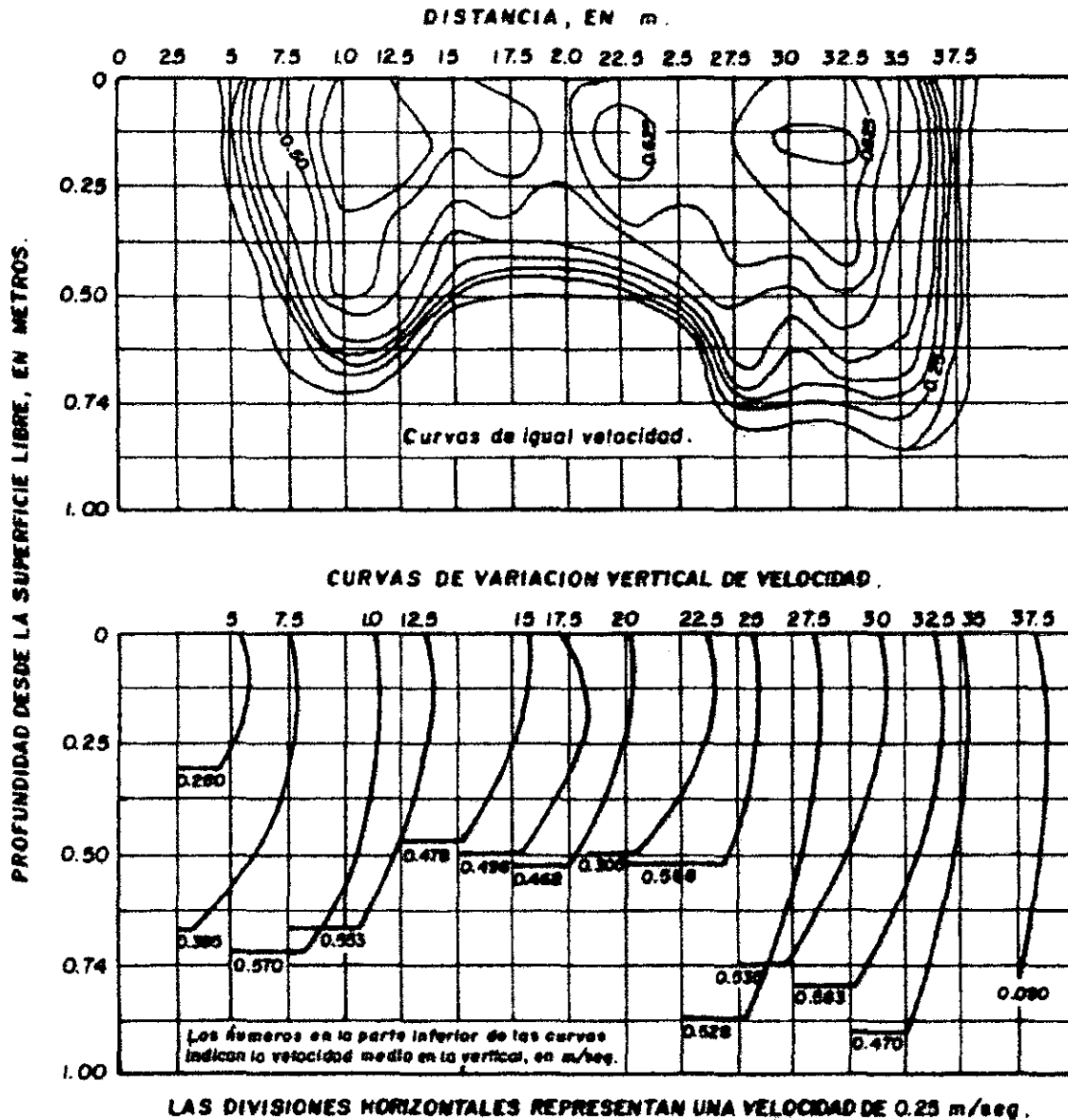
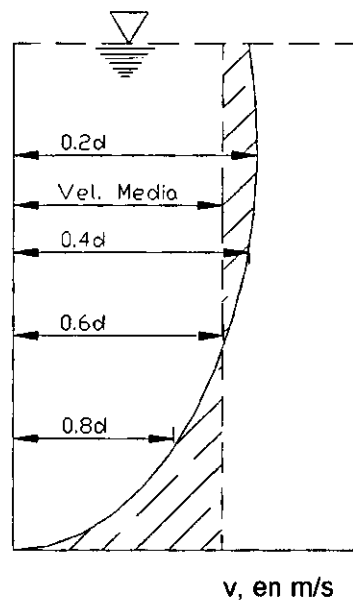


Figura 1.2. Distribución de velocidades en la sección transversal de un cauce natural.

En la figura 1.2. se ilustra la forma de la distribución sobre la vertical y en ella se observa que la velocidad media se localiza a una profundidad aproximada de 0.6 del tirante y es aproximadamente el promedio de la velocidad a 0.2 y 0.8 del tirante o bien entre 0.8 y 0.95 de la velocidad superficial. Es por ello que existen diferentes criterios para la obtención de la velocidad media en la sección transversal de un cauce, es claro que el criterio a emplear dependerá de las características del río, del método de aforo empleado, de la disponibilidad de tiempo y de la precisión deseada.

La rugosidad de un canal aumenta la curvatura de la curva de distribución de velocidades sobre una vertical y provoca que la máxima se presente debajo de la superficie libre. Cabe mencionar, que en cauces muy anchos la distribución de velocidades en la región central de la sección es prácticamente la misma que la que ocurre en un canal rectangular de ancho infinito, esto es, los bordos del canal prácticamente no afectan al flujo.



**Figura 1.2. Distribución de velocidades sobre una vertical en la sección del cauce.**

#### 1.1.4. Curva de gastos.

Una vez que se tiene bien definida la sección de control y el método de aforo más conveniente, se puede finalmente valuar el gasto y conocida la elevación correspondiente de la superficie del agua, es posible dibujar una curva de elevaciones contra gastos. Esta curva es continua si la sección de control es constante y no se presentan alteraciones debidas a sedimentación o erosión y,

además, si la corriente tiene régimen establecido en el momento de efectuar las mediciones.

El disponer de curvas elevaciones-gastos resulta de gran utilidad, pues permite inferir el gasto del río conociendo sólo la elevación de la superficie del agua. Cuando el régimen no está establecido y se desea deducir el gasto a partir de la curva de gastos, se deben hacer correcciones dependiendo de las causas por las que el régimen no esté establecido. Dichos ajustes, se hacen principalmente por variación en la sección de control, por el paso de una avenida o bien por efectos de remanso.

En los capítulos posteriores se profundiza sobre los métodos de ajuste de la curva de gastos, ya que de ser necesario se aplicarán para el ajuste de los resultados obtenidos en los aforos.

#### 1.1.5. Estación de aforo.

Se llama estación de aforo al lugar en el cual se practican observaciones sistemáticas para conocer el régimen de una corriente.

El gasto o volumen de agua que pasa por la sección transversal de una corriente en la unidad del tiempo se determina, mediante una serie de operaciones que constituyen lo que se llama un aforo. El gasto depende directamente del área de la sección transversal de la corriente y de la velocidad media del agua, obteniéndose el gasto con la ecuación de continuidad.

$$Q=AV$$

donde:

Q: gasto, en  $m^3/s$

A: área de la sección transversal, en  $m^2$

V: velocidad media, en  $m/s$

Como se sabe, el área de la sección transversal y la velocidad, varían con la altura del nivel del agua de acuerdo con una relación fija, circunstancia que generalmente se aprovecha para que, una vez conocida dicha relación, puedan obtenerse los gastos, basándose en las alturas registradas en una escala; dicha relación es conocida como "escala-gasto".

## 1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS DE AFORO.

Como resultado de las múltiples formas de operación de canales, ha surgido una gran variedad de métodos para aforar o medir gastos, algunos de los cuales requieren de aparatos complicados y costosos, aunque también los hay más sencillos y relativamente baratos. El mejor método para un caso específico depende del volumen de la corriente, de las condiciones bajo las que se va a hacer el aforo y del grado de exactitud deseado.

Es importante mencionar que a pesar de que existen numerosos métodos para aforar una corriente, todos ellos pueden ser incluidos en alguno de los siguientes grupos:

- 1.- Basados en la medición de la velocidad del agua y el área transversal del cauce (Sección-Velocidad).
- 2.- Aquellos que involucran la construcción de estructuras artificiales, como aforadores, vertedores y rotámetros (Sección-Control).
- 3.- Métodos de aforo por dilución.

Para conocer la relación escala-gasto en un cauce, es necesario practicar una serie de aforos por algunos de los diversos métodos que en seguida se describen.

### 1.2.1. Métodos de Sección-Control.

Los métodos de aforo que involucran la construcción de estructuras y el empleo de molinetes, son los más empleados actualmente en la vida profesional, en las diversas organizaciones dedicadas a la normalización, investigación y reglamentación de los recursos y proyectos hidráulicos; como son la Comisión Nacional del Agua (CNA), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Dirección General de Construcción de Obras Hidráulicas (DGCOH), etc.

#### **Vertedores de cresta delgada y orificios.**

Estos métodos consisten en interponer en el cauce una cortina para represar el agua y obligarla a pasar por una escotadura (vertedor), o un orificio, practicados en la propia cortina.

Se conoce como vertedor a aquella estructura hidráulica (una placa o un muro) por encima de la cual se descarga un líquido a superficie libre. Existen dos tipos de vertedores de acuerdo a la pared; si el líquido descarga por una lámina vertiente o una placa de cualquier forma, el vertedor será de pared delgada; el vertedor se denomina de pared gruesa si el contacto entre la pared y la lámina



vertiente es toda una superficie. A continuación, se presenta una clasificación general de vertedores utilizando diversos criterios: (Ref. 15)

1. Forma:
  - a) Simples: rectangulares, triangulares, trapeciales, etc.
  - b) Compuestos: secciones combinadas.
2. Altura relativa de la cresta:
  - a) Vertedores completos o libres.
  - b) Vertedores incompletos o ahogados.
3. Espesor de la pared:
  - a) Vertedores de pared delgada: placas o madera biselada.
  - b) Vertedores de pared gruesa.
4. Longitud de cresta:
  - a) Vertedores sin contracciones laterales.
  - b) Vertedores con contracciones.

En ambos casos, el gasto depende de la amplitud de la parte vertedora y de la altura del agua sobre la cresta del vertedor o sobre el centro del orificio, respectivamente. Cuando la velocidad de llegada de la corriente a la estructura de aforo es considerable, también tiene influencia en el valor del gasto. Estos dispositivos deben emplearse de preferencia, para aforar pequeños caudales.

Más adelante se profundiza en el tema, para la correcta aplicación de éste método en cauces naturales.

### **Vertedores de cresta ancha.**

Son aforadores a flujo crítico de garganta larga, útiles para la medición de caudales en canales a superficie libre, tales como los canales de riego, a los que se adaptan muy bien. Estos aforadores tiene las particularidad de que es posible obtener sus gastos teóricos, mediante una relación funcional única, en él se pueden aplicar los principios clásicos de hidráulica para establecer la relación carga-gasto con un mínimo de información observable.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) cuenta con un programa de computadora en lenguaje *BASIC* para el diseño de este tipo de estructuras en sus distintas formas sencillas, como las trapezoidales, incluyendo rectángulos y triángulos, además de aforadores de sección transversal compleja.

### Teoría de los medidores de régimen crítico.

En el estudio generalizado de los canales se comprueba que en un canal existe un tirante límite estrechamente relacionado con los regímenes de flujo lento y rápido, el cual se conoce como tirante crítico.

El régimen crítico en la sección de un canal está caracterizado por múltiples condiciones, entre ellas:

- La energía específica es mínima para un gasto dado.
- El gasto es máximo para una energía específica dada.
- La carga de velocidad es igual a la mitad del tirante "y" en un canal de pendiente pequeña.
- El número de Froude es igual a la unidad.
- La velocidad de flujo en un canal de pendiente pequeña con una distribución uniforme de velocidades es igual a la celeridad de pequeñas ondas de gravedad en la superficie del agua a causa de las turbulencias locales.

La ecuación general de régimen crítico es:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} \quad 1.a$$

donde:

Q es el gasto, en m<sup>3</sup>/s

g es la constante de gravitación, en m/s<sup>2</sup>

A es el área hidráulica, en m<sup>2</sup>

T es el ancho de la superficie libre, en m

Para un canal rectangular, donde A=by, T=b y q=Q/b, la ecuación general de régimen crítico con el tirante crítico Y<sub>c</sub> despejado queda:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad 1.b$$

donde:

Y<sub>c</sub> es el tirante crítico, en m

q es el gasto unitario, en m<sup>3</sup>/s/m

Si el tirante  $Y_C$  es conocido, puede despejarse el gasto  $Q$  de la ecuación anterior, quedando:

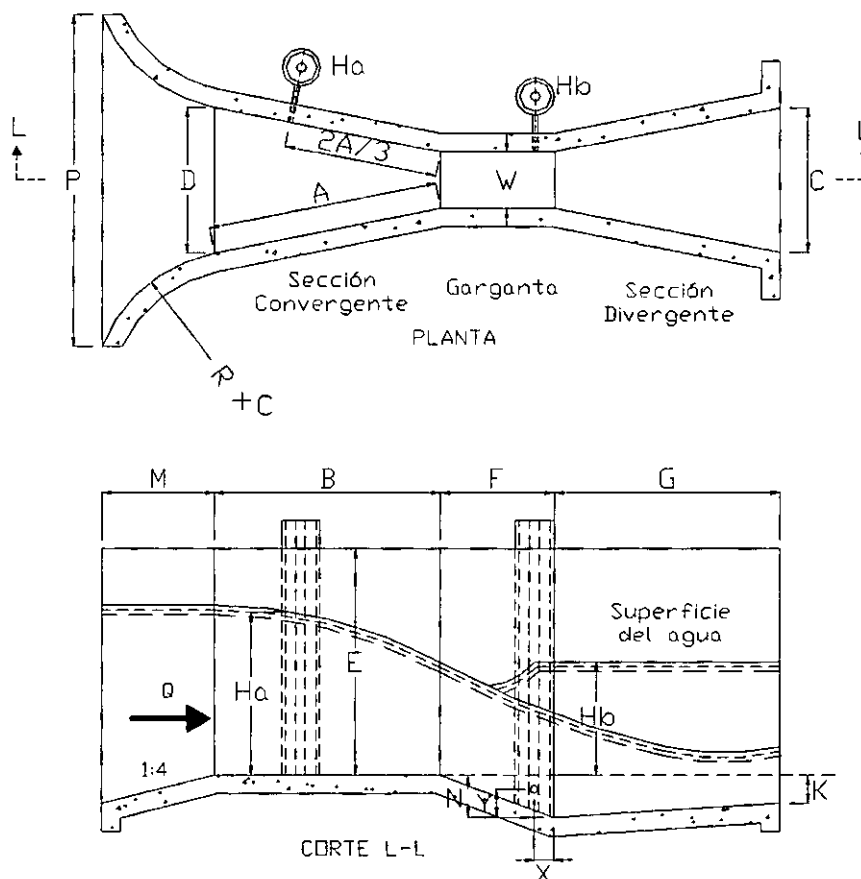
$$Q = \sqrt{Y_C^3 b^2 g} \quad 1.c$$

Diversos investigadores han diseñado estructuras que permiten generar el tirante crítico en secciones definidas, que sirven para conocer el gasto que pasa por dicha sección.

### Medidor Parshal.

Uno de los medidores de régimen crítico más conocido es el aforador *Parshall*. Esta estructura fue diseñada en 1920 por R. L. *Parshall*, ingeniero del Servicio de Irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Consta de tres secciones. La primera es una sección convergente; la segunda, de paredes verticales paralelas, llamada garganta; y la tercera, divergente. Una disposición en planta se muestra en la siguiente figura.



**Figura 1.3. Aforador Parshall**

## Dimensiones del medidor

Los medidores Parshall son indicados nominalmente, por el ancho de la garganta; así, un Parshall de  $W=9$  pulgadas mide 22.86 centímetros en la menor sección transversal. El fondo a nivel en la primera sección, es indicado en la garganta con un declive de 9 vertical: 24 horizontal, cualquiera que sea su tamaño.

En la sección divergente, el fondo es ascendente a razón de 1 vertical: 6 horizontal en el caso de los medidores de 1 a 8 pies. Para estos medidores, la diferencia de nivel entre aguas arriba y el extremo aguas abajo es de 3 pulgadas.

Los menores medidores empleados son de 1 pulgada (0.0254 metros) y puede haber hasta de 50 pies (15.24 metros), teniendo estos una capacidad de 530 cfs (85 m<sup>3</sup>/s).

Existen tablas para el diseño de los canales *Parshall*, en las cuales se emplean las iniciales de la tabla 1.1. En el diseño de estos aforadores se utilizan las dimensiones que se proporcionan en la tabla 1.2. En dicha tabla también se incluye el rango de gastos que cada uno de estos medidores puede manejar. (Ref.5)

W	Ancho nominal del medidor, en pulgadas o pies.
A	Longitud de la pared lateral de la sección convergente.
B	Longitud axial de la sección convergente.
C	Ancho final del canal aguas abajo.
D	Ancho inicial del canal aguas arriba.
E	Profundidad del canal.
F	Longitud de garganta.
G	Longitud de la sección divergente.
K	Diferencia entre el nivel más bajo al final del canal y la cresta.
N	Profundidad de la depresión en la garganta.
R	Radio de las curvas de entrada.
M	Longitud horizontal de entrada.
P	Ancho entre el final de las curvas de entrada.
X	Distancia horizontal del medidor $H_b$ al punto inferior de la garganta.
Y	Distancia vertical del medidor $H_a$ al punto inferior de la garganta.

**Tabla 1.1. Iniciales empleadas en el diseño de aforadores Parshall.**

**Tabla 1.2. Dimensiones típicas de aforadores Parshall**

W		A		B		C		D			E			F		G							
ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm			
0	3	7.62	1	6 3/8	46.67	1	6	45.72	0	7	17.78	0	10 3/16	25.88	2	0	60.96	0	6	15.24	1	0	30.48
0	6	15.24	2	7/16	62.07	2	0	60.96	1	3 1/2	39.37	1	3 5/8	39.69	2	0	60.96	1	0	30.48	2	0	60.96
0	9	22.86	2	10 5/8	87.95	2	10	86.36	1	3	38.10	1	10 5/8	57.47	2	6	76.20	1	0	30.48	1	6	45.72
1	0	30.48	4	6	137.16	4	4 7/8	134.30	2	0	60.96	2	9 1/4	84.46	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
1	6	45.72	4	9	144.78	4	7 7/8	141.92	2	6	76.20	3	4 3/8	102.55	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
2	0	60.96	5	0	152.40	4	10 7/8	149.54	3	0	91.44	3	11 1/2	120.65	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
3	0	91.44	5	6	167.64	5	4 3/4	164.47	4	0	121.92	5	1 7/8	157.16	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
4	0	121.92	6	0	182.88	5	10 5/8	179.39	5	0	152.40	6	4 1/4	193.68	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
5	0	152.40	6	6	198.12	6	4 1/2	194.31	6	0	182.88	7	6 5/8	230.19	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
6	0	182.88	7	0	213.36	6	10 3/8	209.23	7	0	213.36	8	9	266.70	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
7	0	213.36	7	6	228.60	7	4 1/4	224.16	8	0	243.84	9	11 3/8	303.21	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44
8	0	243.84	8	0	243.84	7	10 1/8	239.08	9	0	274.32	11	1 3/4	339.73	3	0	91.44	2	0	60.96	3	0	91.44

W		K			N			R			M			P			X			Y			Rango de Gasto				
ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	ft	in	cm	Cfs		l/s	
																								Min	Máx	Min	Máx
0	3	7.62	0	1	2.54	0	2 1/4	5.72	1	4	40.64	1	0	30.48	2	6 1/4	76.84	0	1	2.54	0	1 1/2	3.81	0.03	1.90	0.85	53.80
0	6	15.24	0	3	7.62	0	4 1/2	11.43	1	4	40.64	1	0	30.48	2	11 1/2	90.17	0	2	5.08	0	3	7.62	0.05	3.90	1.42	110.44
0	9	22.86	0	3	7.62	0	4 1/2	11.43	1	4	40.64	1	0	30.48	3	6 1/2	107.95	0	2	5.08	0	3	7.62	0.09	8.90	2.55	252.02
1	0	30.48	0	3	7.62	0	9	22.86	1	8	50.80	1	3	38.10	4	10 3/4	149.23	0	2	5.08	0	3	7.62	0.11	16.10	3.11	455.90
1	6	45.72	0	3	7.62	0	9	22.86	1	8	50.80	1	3	38.10	5	6	167.64	0	2	5.08	0	3	7.62	0.15	24.60	4.25	696.59
2	0	60.96	0	3	7.62	0	9	22.86	1	8	50.80	1	3	38.10	6	1	185.42	0	2	5.08	0	3	7.62	0.42	33.10	11.89	937.29
3	0	91.44	0	3	7.62	0	9	22.86	1	8	50.80	1	3	38.10	7	3 1/2	222.25	0	2	5.08	0	3	7.62	0.61	50.40	17.27	1427.17
4	0	121.92	0	3	7.62	0	9	22.86	2	0	60.96	1	6	45.72	8	10 3/4	271.15	0	2	5.08	0	3	7.62	1.30	67.90	36.81	1922.71
5	0	152.40	0	3	7.62	0	9	22.86	2	0	60.96	1	6	45.72	10	1 1/4	307.98	0	2	5.08	0	3	7.62	1.60	85.60	45.31	2423.92
6	0	182.88	0	3	7.62	0	9	22.86	2	0	60.96	1	6	45.72	11	3 1/2	344.17	0	2	5.08	0	3	7.62	2.60	103.50	73.62	2930.79
7	0	213.36	0	3	7.62	0	9	22.86	2	0	60.96	1	6	45.72	12	6	381.00	0	2	5.08	0	3	7.62	3.00	121.40	84.95	3437.67
8	0	243.84	0	3	7.62	0	9	22.86	2	0	60.96	1	6	45.72	13	8 1/4	417.20	0	2	5.08	0	3	7.62	3.50	139.50	99.11	3950.20

### Condiciones de Descarga.

El flujo a través de un medidor *Parshall* se puede verificar en dos condiciones diferentes correspondientes a dos regímenes distintos:

- a) flujo o descarga libre.
- b) ahogamiento o sumersión.

En el primer caso, la descarga se hace libremente como en los vertedores, en que la vena vertiente es independiente de las condiciones aguas abajo. El segundo caso ocurre cuando el nivel aguas abajo es suficientemente elevado para influir y retardar el flujo a través del medidor: es el régimen comúnmente señalado como descarga sumergida, de características diferentes a las que se emplean para los vertedores.

El ahogamiento es provocado por condiciones aguas abajo, obstáculos existentes, falta de declive o niveles obligados en tramos o unidades subsecuentes.

En el caso de flujo libre es suficiente medir la carga  $H_a$  para determinar el caudal. Si el medidor es ahogado, será necesario medirse también una segunda carga  $H_b$  en un punto próximo a la sección final de la garganta.

La relación  $H_b/H_a$  es la relación de sumersión. Si el valor de  $H_b/H_a$  es igual o inferior a 0.60 (60%), para los *Parshall* de 3, 6 o 9 pulgadas, o igual o inferior a 0.70 (70%) para los medidores de 1 a 8 pies; la descarga será libre. Si estos límites son excedidos, habrá ahogamiento y el gasto será reducido. Será entonces necesario medir las dos alturas para poder calcular el gasto. Entonces, la descarga real será inferior a la obtenida con  $H_a$ , siendo indispensable aplicar una corrección negativa.

En la práctica, siempre que es posible se trata de tener descarga libre, por el hecho de quedar restringido a una medición de carga única. A veces esa condición no puede ser conseguida o establecida, debido a circunstancias locales o a limitaciones impuestas. De cualquier forma, la sumersión no debe nunca exceder el límite práctico de 95%, pues arriba de este valor, no puede contarse con la precisión deseable, ya que se presenta el ahogamiento casi total y un remanso considerable hacia aguas arriba.

### Puntos de Medición.

Con la descarga libre, la única medida de carga  $H_a$ , necesaria y suficiente para conocerse el caudal, es hecha en la sección convergente, en un punto localizado a 2/3 de la dimensión de B (o 2/3 de A).

En esta posición se puede medir el tirante del agua con una regla o se instala junto al muro, una escala para lecturas. Se puede también asentar un pozo, como el mostrado en el esquema, de 1 a 2 pulgadas de diámetro con una boya o un limnómetro de gancho en su interior.

Si las condiciones de flujo fuesen las de sumersión, además de la medida en la posición especificada arriba, será necesario medir la altura del nivel del agua  $H_b$ , en un punto máximo de la sección final de la garganta. La posición de esta torre se muestra en el esquema del canal Parshall y depende de las dimensiones de X y Y.

Las dos cargas  $H_a$  y  $H_b$  son medidas a partir de la misma referencia: cota de fondo de la sección convergente. (Ref. 10)

### **Ventajas de los Medidores Parshall.**

Las ventajas de los medidores Parshall, pueden ser resumidas como sigue:

- Gran facilidad de construcción.
- Bajo costo de ejecución.
- No hay sobreelevación de fondo.
- No hay peligro de formación de depósitos debido a materias en suspensión, siendo por ello de gran utilidad en el caso de alcantarillas o de aguas que llevan sólidos en suspensión.
- Pueden funcionar como un dispositivo en que en una sola medición de H sea suficiente.
- Gran habilidad en soportar sumergencias elevadas, sin alteración de caudal.
- Medidores Parshall de los más variados tamaños han sido ya ensayados hidráulicamente, lo que permite su empleo en condiciones semejantes, sin necesidad de muchos ensayos o aforos.
- En su ejecución pueden ser empleados diversos materiales, seleccionándose el más conveniente para las condiciones locales. Ya han sido construidos de: concreto, mampostería, madera, metal, etc.

### **Fórmulas y Tablas**

Los numerosos experimentos y observaciones hechos con medidores Parshall llevaron a resultados correspondientes a expresiones del tipo:

$$Q = KH_a^n \quad 1.d$$

En la tabla 1.3. se muestran los valores del coeficiente K y los del exponente n, tanto en sistema métrico como en sistema inglés, en tanto que la tabla 1.4. es una relación de gastos en función del tamaño del medidor y de la carga  $H_a$ , útil para una determinación más directa de los gastos.

		W		n	K	
ft	in	m			U. Inglesas	U. Métricas
3		0.0762		1.547	0.992	0.176
6		0.1524		1.580	2.060	0.381
9		0.2286		1.530	3.070	0.535
1		0.3048		1.522	4.000	0.690
1	6	0.4572		1.538	6.000	1.054
2		0.6096		1.550	8.000	1.426
3		0.9144		1.566	12.000	2.182
4		1.2192		1.578	16.000	2.935
5		1.5240		1.587	20.000	3.728
6		1.8288		1.595	24.000	4.515
7		2.1336		1.601	28.000	5.306
8		2.4384		1.606	32.000	6.101

**Tabla 1.3. Valores del exponente n y del coeficiente K.**

H <sub>a</sub> [cm]	W	3"	6"	9"	1'	1.5'	2'	3'	4'
	K	0.176	0.381	0.535	0.690	1.054	1.426	2.182	2.935
	n	1.547	1.580	1.530	1.522	1.538	1.550	1.566	1.578
3		0.776	1.495	2.502	3.319	4.794	-	-	-
4		1.210	2.356	3.886	5.143	7.461	-	-	-
5		1.709	3.352	5.467	7.222	10.516	13.725	20.019	-
6		2.266	4.471	7.226	9.532	13.920	18.208	26.634	34.636
7		2.877	5.704	9.149	12.053	17.644	23.122	33.906	44.175
8		3.537	7.044	11.222	14.769	21.667	28.439	41.792	54.536
9		4.244	8.485	13.438	17.669	25.970	34.135	50.257	65.675
10		4.995	10.021	15.789	20.742	30.538	40.190	59.273	77.555
11		5.788	11.650	18.268	23.980	35.359	46.588	68.814	90.142
12		6.622	13.367	20.869	27.376	40.422	53.315	78.859	103.408
13		7.495	15.169	23.588	30.922	45.718	60.358	89.390	117.330
14		8.406	17.053	26.420	34.614	51.237	67.705	100.390	131.886
15		9.352	19.017	29.361	38.447	56.973	75.346	111.844	147.055
16		10.334	21.059	32.408	42.415	62.918	83.273	123.739	162.821
17		11.351	23.176	35.558	46.515	69.067	91.478	136.062	179.166
18		12.400	25.366	38.808	50.743	75.414	99.952	148.803	196.078
19		13.482	27.628	42.155	55.095	81.953	108.690	161.951	213.541
20		14.595	29.961	45.596	59.569	88.680	117.684	175.496	231.544
25		20.612	42.626	64.151	83.659	124.989	166.313	248.902	329.274
30		27.329	56.856	84.791	110.415	165.445	220.626	331.151	439.041
35		34.689	72.536	107.344	139.611	209.709	280.172	421.566	559.948
40		42.648	89.574	131.676	171.074	257.519	344.598	519.614	691.288
45		51.172	107.895	157.677	204.663	308.661	413.618	624.864	832.487
50		-	-	185.258	240.260	362.958	486.993	736.956	983.066
55		-	-	214.343	277.767	420.260	564.523	855.584	1142.616
60		-	-	244.864	317.099	480.438	646.032	980.482	1310.783
65		-	-	-	358.182	543.377	731.367	1111.417	1487.255
70		-	-	-	400.948	608.978	820.392	1248.183	1671.756

**Tabla 1.4. Gastos en medidores Parshall (l/s).**



### Medidores ahogados.

Si las condiciones de flujo son tales que se verifica el ahogamiento, serán necesarias dos medidas de nivel de agua para la determinación del porcentaje de sumersión. El ahogamiento retarda el flujo, habiendo una reducción de descarga. En estas condiciones, el caudal real será inferior a aquel que se obtendría por medio de la fórmula o tablas. Para la determinación del caudal será indispensable la aplicación de una corrección.

$$Q_{real} = Q_{descarga libre} - Q_{corregido} \quad 1.e$$

### Pérdidas de Carga.

La geometría y el funcionamiento propios de canal Parshall provocan una pérdida de carga importante. Esta pérdida debe ser tomada en consideración cuando se diseña un Parshall, dependiendo de las condiciones aguas abajo que se tengan.

Finalmente se concluye, que este medidor es recomendable para el aforo de canales y pequeños ríos, estando indicado especialmente para canales de riego de poca pendiente. Se recomienda también para la medida del escurrimiento en drenes, donde no es conveniente instalar vertedores y otras estructuras que alteren el régimen del escurrimiento.

### 1.2.2. Métodos de sección y velocidad.

Estos métodos consisten en determinar separadamente la sección transversal de la corriente y la velocidad media del agua; la sección por medio de sondeos o algún otro procedimiento topográfico y la velocidad por cualquiera de los métodos que se citan en este capítulo.

La clasificación de las estaciones de aforo, de acuerdo con el medio utilizado para cruzar la corriente, al hacer los aforos, es la siguiente:

- Estaciones de vado.
- Estaciones de pasarela.
- Estaciones de puente.
- Estaciones de cable y canastilla.
- Estaciones de bote o canoa.
- Estaciones en grandes ríos.

**Partes de que consta una estación.**

Las estaciones donde se emplea el método de sección y velocidad, están constituidas por un tramo del cauce llamado tramo de aforo, donde se practican todas las operaciones del aforo, y en el cual están localizadas:(Ref.3)

1. La sección o secciones del cauce en las que se hacen los aforos, designándose por ello, secciones de aforo.
2. Una estructura que se aprovecha o destina especialmente para hacer las maniobras y observaciones llamada "estructura de aforo".
3. Reglas graduadas llamadas escalas, debidamente referidas a bancos fijos de nivel, para observar en ellas la elevación del nivel del agua en períodos determinados.
4. Un reborde natural o artificial establecido en el cauce, según una sección transversal de éste, aguas abajo de la sección de aforo, y que sirve para regular la relación entre los gastos y las alturas de la lámina del agua. A esta parte se le llama control de la estación.
5. El equipo y útiles necesarios para la medida de la sección y la velocidad de la corriente.
6. Un aparato registrador de las alturas del agua (limnógrafo), en las estaciones de importancia o cuando se trata de corrientes con fluctuaciones de nivel considerables.

Este tramo de aforo en que se localizan las partes citadas, es conveniente que reúna ciertas características que deberán cumplirse hasta donde sea posible, ya que de ellas depende el buen funcionamiento y la eficiencia de la estación, por lo que es necesaria conceder la debida importancia a su elección.

En resumen, la selección de un sitio adecuado para el establecimiento de una estación de aforos, implica la localización de un lugar inmediato al punto donde se necesita conocer el régimen de la corriente, fácilmente accesible, donde pueda instalarse una estructura segura y económica y donde el tramo de aforos sea recto, regular, prácticamente invariable y en un lecho impermeable lo que permitirá obtener datos suficientemente precisos.

A continuación se describen los diversos métodos de aforo que se basan en la determinación de la velocidad media de la corriente y el área de la sección transversal del cauce.

**Flotadores.**

Son cuerpos más ligeros que el agua y que conducidos en suspensión por la corriente adquieren una velocidad que resulta, según la clase de flotadores empleados (superficiales o sumergidos), más o menos igual a la de dicha corriente. La velocidad se mide tomando el tiempo que emplean en recorrer un tramo de longitud conocida, siendo dicha velocidad el cociente de dividir la longitud del tramo entre el tiempo empleado en recorrerla.

Los flotadores superficiales son los que se desalojan flotando en la superficie del agua. y por lo mismo con ellos se obtiene la velocidad superficial. Pueden emplearse trozos de madera, algunos frutos, etc., procurándose que la parte no sumergida presente la menor superficie a la acción del viento.

Los flotadores sumergidos o bastones tienen forma de barra y al ser puestos en la corriente, toman una posición vertical, extendiéndose desde la superficie hasta cerca del fondo, proporcionando, por lo tanto, un promedio de las velocidades de la corriente en el tramo que recorren; pero sólo pueden usarse en cauces de sección muy uniforme. Lo cual resulta ser una enorme limitante en el uso de éste método, debido a que la mayoría de los cauces naturales no cuentan con una sección uniforme. (Ref.3)

**Molinete.**

De todos los métodos señalados anteriormente, el más práctico y económico es aquel en que se emplea un molinete hidráulico para la determinación de la velocidad del agua. Este procedimiento es el usado en la casi totalidad de los casos, a excepción de aquellos en que por alguna razón resulta imposible utilizarlo.

El molinete hidráulico, es un aparato que tiene por objeto, ayudar a medir la velocidad del agua a través de una rueda con aspas o copas, la cual gira por el choque del agua contra ellas, permitiendo conocer la velocidad de la misma, en el lugar en que está colocado el molinete. En el Capítulo II de este trabajo se expondrá a detalle la descripción del molinete, así como la aplicación del método.

**Relación sección-pendiente.**

Este criterio permite obtener el gasto de una corriente a partir de la fórmula de Manning. Para esto se requiere conocer las características topográficas del tramo de río donde se quiera valuar el gasto y el nivel del agua para ese gasto en las secciones transversales de inicio y terminación del tramo. El tramo de río debe ser lo más uniforme posible, para no tener secciones de control dentro de él.

Según Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 1.f$$

donde:

- n coeficiente de rugosidad de Manning
- R radio hidráulico, en m
- S pendiente del gradiente de energía
- V velocidad media, en m/s

Si se conoce el área hidráulica de la sección transversal A, sustituyendo la ec. 1.f en la ec. de continuidad, se tiene que el gasto es:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 1.g$$

Si se denomina con subíndice 1 a las características de la sección inicial aguas arriba del tramo en estudio, y con subíndice 2 a las características de la sección final aguas abajo del tramo, los elementos de la ec. 1.g se pueden calcular como sigue:

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2}, \quad R = \frac{R_1 + R_2}{2}, \quad S = \frac{h_f}{L} \quad y \quad h_f = z + h_v + h_i, \quad 1.h$$

donde:

- $h_i$  pérdida por turbulencia, en m
- $h_v$  pérdida de carga de velocidad, en m
- z desnivel entre las secciones 1 y 2, en m
- L longitud horizontal entre las secciones 1 y 2, en m

En general, las pérdidas  $h_v$  y  $h_i$  pueden despreciarse, aunque pueden ser de consideración si las velocidades en las secciones 1 y 2 son muy diferentes.

Debido a su sencillez, este criterio tiene gran aplicación cuando se desea conocer el gasto en un río del cual no se disponen datos. Debe considerarse que en este criterio se supone un régimen establecido; esto no ocurre cuando se tiene una avenida, que generalmente es el caso de mayor interés. Por otra parte, el gasto está en relación directa con el coeficiente de rugosidad de Manning, lo que origina, que un error en la valuación de este trasciende en el valor del gasto.

Este criterio es ideal para completar registros de gastos de una estación-hidrométrica, ya que en este caso se dispone de suficientes datos para valuar con bastante precisión el coeficiente de rugosidad de Manning.

### **Otros métodos.**

Otros procedimientos para determinar la velocidad de una corriente pequeña, consisten en utilizar tubos de Venturi, tubos de Pitot, etcétera. Sin embargo, estos métodos son poco empleados para el aforo de escurrimiento a superficie libre, es por ello que sólo se mencionan superficialmente.

#### **1.2.3. Medidor de Flujo Electromagnético.**

Este método consiste en realizar el aforo por medio de un medidor electromagnético, dicho aparato no necesita de ninguna estructura que obstruya el flujo en el cauce ni tampoco del sometimiento del flujo a presión, por lo que no altera el flujo. Su principio básico es un conductor que se mueve en un campo magnético y produce una fuerza electromotriz. Los líquidos con cierto grado de conductividad generan voltaje entre los electrodos, siendo este voltaje proporcional a la velocidad del flujo en el cauce.

Existen diferentes marcas de medidores electromagnéticos, sin embargo el principio de operación es el mismo. En los siguientes capítulos se aplicará el método de aforo con este medidor y se describirá a detalle su funcionamiento, así como las consideraciones, ventajas, desventajas y rangos de aplicación.

#### **1.2.4. Métodos químico e isótopos radioactivos.**

En las corrientes de montaña y en los cauces muy pequeños, el uso de molinete o de flotadores es prácticamente imposible. En tales casos pueden ser muy útiles las mediciones realizadas por medio de sustancias trazadoras. Pudiéndose utilizar la sal común, los materiales radioactivos, las sustancias fluorescentes y en general cualquier otro que se pueda medir fácilmente, que no esté presente en la corriente y que no se pierda por acción química al combinarse con las sustancias presentes en el agua del cauce.

#### **Aforo químico por integración.**

Este método consiste en verter súbitamente al río un volumen (V) conocido de disolución concentrada ( $N_1$ ), con un peso (P) de sal disuelta ( $P=N_1 \cdot V$ ) y mediante la oportuna extracción de muestras, comprobar el paso del volumen total vertido aguas arriba, ahora ya disuelto formando una nube expansiva, con

concentración prácticamente uniforme en sentido transversal y longitudinal, con su máximo al centro y disminuyendo hacia los bordes.

Si en un punto aguas debajo de la inyección se muestra la nube por medio de (p) muestras a intervalos iguales, cuyas concentraciones ( $n_2$ ) al ser dibujadas en el eje de las ordenadas contra los tiempos de extracción en las abscisas, definen una curva en forma de campana, cuya área (A) es igual al producto de la concentración media ( $N_2$ ) por el tiempo total (T) entonces: (Ref. 10)

$$Q = \frac{P}{\int_0^T n_2 dt} = \frac{P}{N_2 * T} \quad 1.i$$

La sal disuelta o trazador que se inyecta puede ser cloruro de sodio, nitrito de sodio, sulfato de magnesio, bicromato de sodio y rodamina. En general los más utilizados son los dos últimos.

En el método por integración, su forma operativa puede llevarse a cabo de dos maneras: la primera es extraer p muestras a intervalos iguales y del mismo volumen, mezclarlas y determinar la concentración media  $N_2$  de todo el volumen; la segunda forma es utilizando una bomba pequeña de gasto constante, la cual llena una muestra en el tiempo de paso de la nube. (Ref. 10)

Este sistema de aforo es apropiado para corrientes pequeñas de escurrimiento turbulento.

### Aforo químico por dilución.

Este método se basa en establecer un régimen permanente de un gasto constante (q), de disolución concentrada ( $N_1$ ) que se vierte sobre un gasto (Q) que transporta el río, donde la disolución resultante está diluida ( $N_2$ ). Entonces de acuerdo a la ecuación de continuidad se tiene:

$$Q = q \left( \frac{N_1}{N_2} - 1 \right) \quad 1.j$$

donde:

- q es el gasto de inyección, en l/s
- $N_1$  es la disolución concentrada, en gr/l
- $N_2$  es la disolución resultante, en gr/l

Una condición para la correcta aplicación de este método es que el gasto inyectado (q) sea constante y para ello se requiere de un dispositivo especial con:

un tanque elevado, un inyector de gasto constante con depósito de excedentes y una tubería de inyección.

En este método la sustancia trazadora utilizada comúnmente es el dicromato de sodio y en la práctica se manejan los valores siguientes:

- a)  $q$  varía de 0.10 a 0.30 l/s según si el gasto fluctúa de 15 a 100 m<sup>3</sup>/s.
- b)  $N_1 = 250$  gr/l.

### **Medidor químico.**

Existe un medidor portátil que funciona con base al método de Dilución de Sal para el cálculo del caudal. Dicho medidor tiene un rango de 10 a 4000 l/s, una resolución de 1 l/s y una reproducibilidad de menos del 5% de diferencia.

Puede ser usado en la medición de flujo en diferentes puntos de la corriente sin interferir ni obstaculizar a ésta.

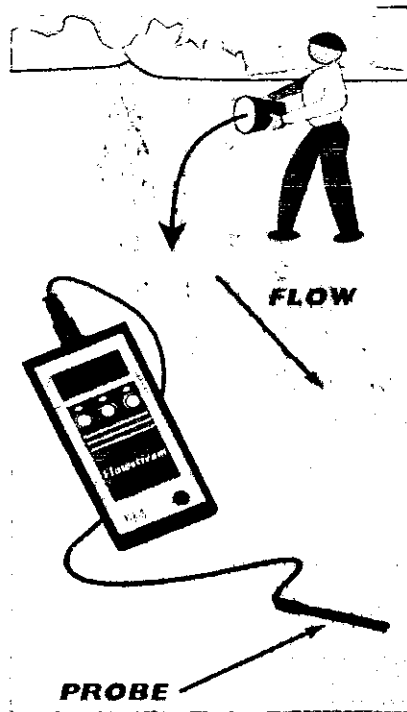
Dicho aparato es el medidor de gasto *Flowstream*, el cual fue desarrollado por Dulas Ltd. (una compañía de energía renovable, especializada en pequeños sistemas hidroeléctricos).

El medidor ha sido probado por diferentes unidades independientes del Reino Unido, como el *Institute of Hydrology*, el cual ha reconocido su elevada exactitud y reproducibilidad de resultados.

### **Proceso de medición:**

- 1.- Se disuelve una pequeña cantidad de sal común (300 a 500 g generalmente) en un cubo de agua.
- 2.- Se vierte la disolución de agua con sal en la corriente metros arriba.
- 3.- Se introduce el medidor, el cual monitorea la sal que pasa por el sensor y automáticamente realiza el cálculo del flujo.

Como se observa (figura 1.4), la medición de flujo en cauces ya no requiere de construcción de estructuras o largos periodos de tiempo, realmente este método de aforo resulta muy práctico sin descuidar la exactitud.



**Figura 1.4. Procedimiento y medidor de gasto por dilución química.**

### **Método con isótopos radioactivos.**

Se inicia el desarrollo de este método con la definición de isótopo:

Isótopo: Especie del mismo elemento que, teniendo el mismo número atómico que otra u otras sustancias, se diferencia por las masas de sus átomos.

Las técnicas isotópicas son una herramienta fundamental para el estudio del recurso agua, especialmente en zonas áridas. Se determinan distintos procesos que afectan la cantidad y disponibilidad del recurso. También es posible determinar el origen de las aguas, relaciones entre aguas superficiales y subterráneas, zona de recarga del agua subterránea, la interconexión de acuíferos, edad del agua subterránea, infiltración, aforos, etc.

Las aplicaciones en hidrología y medio ambiente se basan en la variación de la composición isotópica producida por fenómenos naturales o artificiales.



Este método se puede emplear tanto en tuberías, canaletas, ríos o canales.

La inyección de un trazador permite obtener la velocidad y/o el caudal de las corrientes mediante la detección del trazador en dos o más puntos de control ubicados aguas abajo de la inyección y donde se asegure la mezcla total del trazador con el fluido. Este método se utiliza para la calibración de otros instrumentos de medición convencionales.

Sin embargo éste método tiene la desventaja de requerir del levantamiento de la sección transversal media del tramo y por ello el uso de sustancias trazadoras se lleva a cabo a través de los aforos químicos, los cuales expliqué anteriormente.

Los modos en los que se utilizan los isótopos radioactivos son muy similares a los de las sustancias químicas, sin embargo tienen las siguientes ventajas: (Ref.12)

- El indicador puede seleccionarse de tal forma que éste muestre el mismo comportamiento que el fluido.
- La cantidad del indicador es tan pequeña que su adición al fluido no afecta.
- La medición se lleva a cabo sin afectar la corriente.
- La exactitud es mayor que la de los métodos convencionales.

### 1.2.5. Métodos alternativos.

#### Aforador ultrasónico.

Es otro método de aforo que consiste en determinar la velocidad media en el cauce, para que una vez conocida el área de la sección transversal se determine por medio de la aplicación de la ecuación de continuidad, el gasto en el río.

Dicho método ultrasónico, consiste en la medición de la diferencia en tiempo de recorrido de una onda sonora oscilando entre dos estaciones de medición. La diferencia en el tiempo de recorrido es proporcional a la velocidad del flujo. (Ref.9)

#### Aforador acústico.

Este tipo de medidor pertenece también a los de tipo ultrasónico, sin embargo su operación está basada en el principio del efecto *Doppler*, el cual nos dice que cuando una onda ultrasónica se proyecta en un fluido no homogéneo,

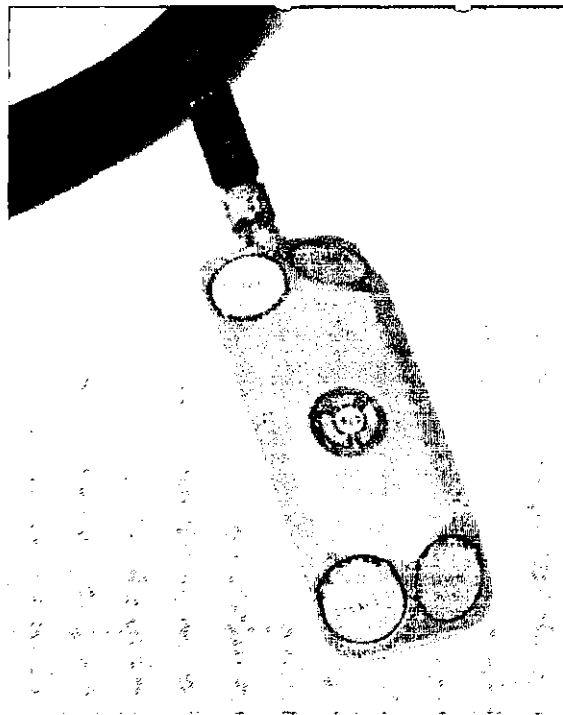
una cierta cantidad de energía acústica es devuelta al transmisor a una frecuencia distinta. La diferencia de frecuencia medida está relacionada de forma directa con la velocidad del flujo.

A continuación se describe el aforo por medio de un medidor acústico, así como su funcionamiento.

El medidor se compone de un aparato transductor, el cual se monta en el flujo, una unidad de procesamiento de señal y un cable para lograr la comunicación. Como se sabe, un transductor es un dispositivo que convierte la potencia eléctrica de una corriente en potencia acústica o mecánica o viceversa.

El transductor se monta en el canal o río, el cual emite pulsos cortos por rayos acústicos estrechos en diferentes direcciones. Posteriormente los ecos por el efecto *Doppler* cambian de frecuencia. La medida de esta frecuencia habilita el cálculo de la velocidad del flujo.

El transductor divide la señal de regreso en intervalos regulares distintos que corresponden a las profundidades diferentes en el flujo. La velocidad se calcula con base en el cambio de la frecuencia medido en cada intervalo. El resultado es un perfil, o la distribución lineal de velocidades.



**Figura 1.5. Medidor acústico.**

Cada uno de los segmentos rectangulares en la figura 1.6. representa una medida individual de la velocidad en un volumen pequeño conocido como una célula de profundidad.

Los sensores con que cuentan los medidores acústicos, son de forma cilíndrica de aproximadamente 5 centímetros (2 pulgadas) de largo y 5 centímetros (2 pulgadas) de diámetro. Esto asegura que las medidas de la velocidad son sensiblemente representantes de esa porción del flujo.

El resultado de aforar con ese instrumento es una medida muy precisa de la velocidad vertical y la distribución transversal de velocidades del flujo. Los datos de la velocidad de los dos perfiles se ingresan a un algoritmo para determinar una ecuación matemática de las velocidades del flujo a través de la sección transversal entera del flujo. El algoritmo proporciona las funciones de la base de un modelo paramétrico a los datos verdaderos.

El resultado de dicho modelo predice el comportamiento de las velocidades del flujo. Estos resultados se integran sobre el área para determinar la descarga.

El beneficio es que el sistema opera exactamente bajo condiciones hidráulicas diferentes. Cuando las condiciones hidráulicas cambian, el cambio se manifiesta en la distribución de la velocidad a través de la profundidad del flujo. Cuando el medidor acústico mide la distribución de la velocidad directamente, se adapta a los cambios hidráulicos, y genera un modelo del flujo que es representativo de las condiciones hidráulicas nuevas, asegurando una estimación exacta de la tasa del flujo.

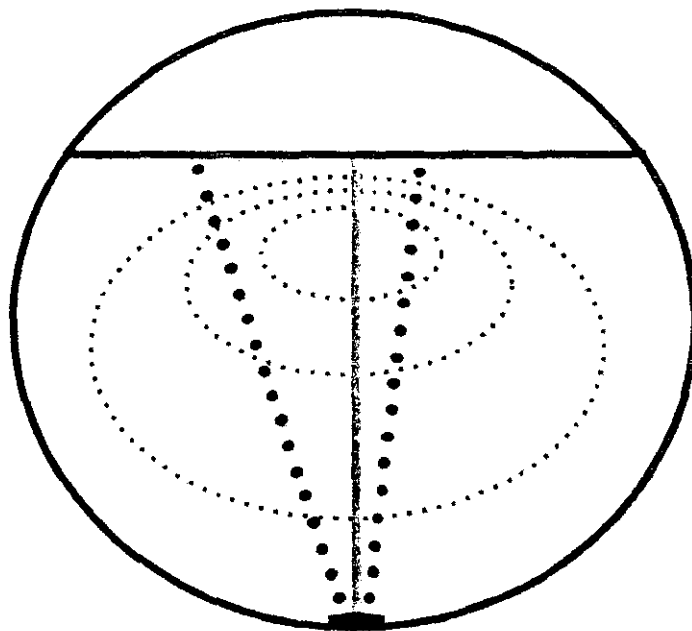
Resulta muy interesante conocer este tipo de medidor, ya que es un instrumento con tecnología de punta y además de ello realmente los resultados que se han obtenido en los diversos proyectos en que se ha implementado son realmente sorprendentes; con un error entre el 1 y 2%. Además de que permite obtener la distribución de velocidad en la sección transversal del cauce.

Dicho aparato se utiliza también para la determinación del arrastre de sedimentos, realmente vale la pena conocerlo y difundir su uso.

Es importante mencionar, que la exactitud obtenida en la determinación del gasto, no sólo depende de la precisión del medidor, sino de la correcta obtención de la batimetría de la sección transversal del cauce, ya que este medidor se aplica con base en el método sección-velocidad.

Las principales ventajas de este método de aforo son:

- Se obtiene una exactitud muy alta, del orden del 98% en la determinación de la velocidad media de la sección transversal del cauce.
- No se requiere calibrar *in-situ*.
- Los medidores cuentan con dispositivos que interpretan automáticamente los resultados.
- Se puede emplear en cualquier tipo de condiciones hidráulicas.
- No se requiere de una sección transversal muy específica.
- El tiempo de aforo se reduce considerablemente.



**Figura 1.6. Método de aforo con medidor acústico.**

### 1.3. APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS .

Hasta el momento se ha dado una descripción general de los diferentes métodos de aforo que existen para la medición de gasto en un cauce, sin embargo el objetivo de este trabajo es la comparación entre algunos de ellos (vertedor de pared delgada, molinete y medidor electromagnético). Por que al final de este trabajo, se presenta una lista comparativa y detallada de la aplicabilidad, ventajas y desventajas de los métodos empleados en el modelo de cauce natural.

Existe un cuadro de la aplicabilidad de las técnicas de medición de gasto de un cauce, realizado por el D. I. Smith y P. Stopp; el cual se presenta a continuación: (Ref.2)

Tamaño de la corriente	Métodos de área y velocidad		Estructuras artificiales (aforadores y vertedores)	Métodos de aforo por dilución
	Usando un medidor de velocidad	Usando flotadores		
Pequeña	Difícil si la corriente es somera, menor de 30 cm.*	No muy útil si la corriente es somera, menor de 30 cm.	Vertedores triangulares y rectangulares son los más usuales.	Buen método y factible de utilizar con sal como disolvente.**
Mediana	Métodos de vadeo, cable canastilla o en puentes.*	Útil como método de reconocimiento.**	Posible con aforadores, con gastos de hasta 100m <sup>3</sup> /s.	Posible, utilizando tintes y equipo sensible.
Grande	Requiere cable y canastilla.	Para reconocimiento o en avenidas.	No aplicable debido al tamaño y al costo.	Posible, pero rara vez usado.

\* Método apropiado si se dispone de algún medidor de velocidad.

\*\* Método que requiere relativamente poco equipo.

### Tabla 1.5. Aplicabilidad de las técnicas de medición.

Si bien, estas recomendaciones propuestas por Smith y Stopp, son de gran utilidad, resultan incompletas; ya que no se detallan las ventajas, desventajas y consideraciones que se tiene en cada uno de los métodos.

Por ello, en los Capítulos III y IV se hace un análisis exhaustivo de los tres métodos aplicados, con el fin de llegar a la obtención de un cuadro más específico y detallado de éstos.

---

**CAPÍTULO II****DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

Esta parte del trabajo, tiene como objetivo principal el establecimiento de las características, consideraciones y dimensionamiento de la estructura para la aplicación de los tres métodos de aforo mencionados. En la primera parte se describe físicamente el modelo de cauce natural y del tramo de aforo. La segunda, comprende la descripción y procedimiento de aforo con cada método (Vertedor Triangular de Pared Delgada, Micromolinete y Medidor de Flujo Electromagnético), fórmulas y tablas que se emplearán para la medición y obtención de resultados.

**2.1. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL CAUCE NATURAL.**

La estructura que se empleó para la aplicación de los distintos métodos de aforo, es un simulador de cauce natural que se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería. Dicha estructura consta de:

- a) Obra de excedencias con tanque amortiguador: es una estructura conectada al vertedor de canal lateral, con forma de "L" y comprende: un tanque prismático colector de gasto de dimensiones 1.97 x 1.45 x 1.34 m, vertedor de cimacio, rápida de descarga, tanque amortiguador y canal de entrega al simulador de cauce natural. El área de este canal es de 4.74 x 1.25 m y tiene una altura promedio de 0.80 m. El material de la estructura es concreto y mampostería.
- b) Simulador de cauce natural: es un canal de sección irregular con revestimiento rugoso que está conectado al canal aguas debajo de la estructura descrita anteriormente. La rugosidad que se le ha dado es con el fin de obtener las condiciones de un cauce natural. Sus dimensiones son las siguientes: 8.77 m de longitud, ancho mayor de 1.41 m, ancho menor de 0.1 m y profundidad de 1.20 m. Aguas arriba está provisto con un tanque colector de gasto con su respectivo vertedor triangular de pared delgada, dicho tanque mide 0.67 x 1.41 x 1.18 m.

El gasto máximo que puede ser proporcionado al cauce es de 31.00 l/s.

Es importante mencionar que a pesar de que el modelo de cauce cuenta con dos estructuras de suministro de gasto (vertedor triangular "A" y "B"), sólo se trabajó con el gasto que proporciona el "A"; ya que el que se encuentra en el tanque colector aguas arriba (vertedor "B") del cauce, no cumple en su totalidad con ningún criterio para determinar el coeficiente de gasto.

En las siguientes figuras se puede apreciar, la estructura del cauce.

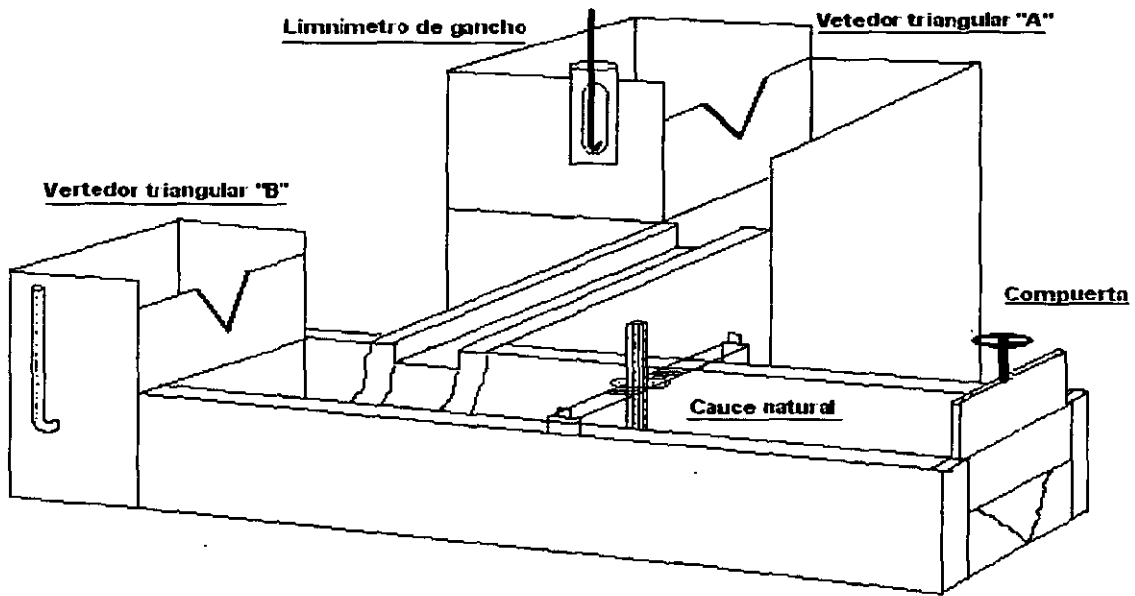


Figura 2.1. a) Croquis.

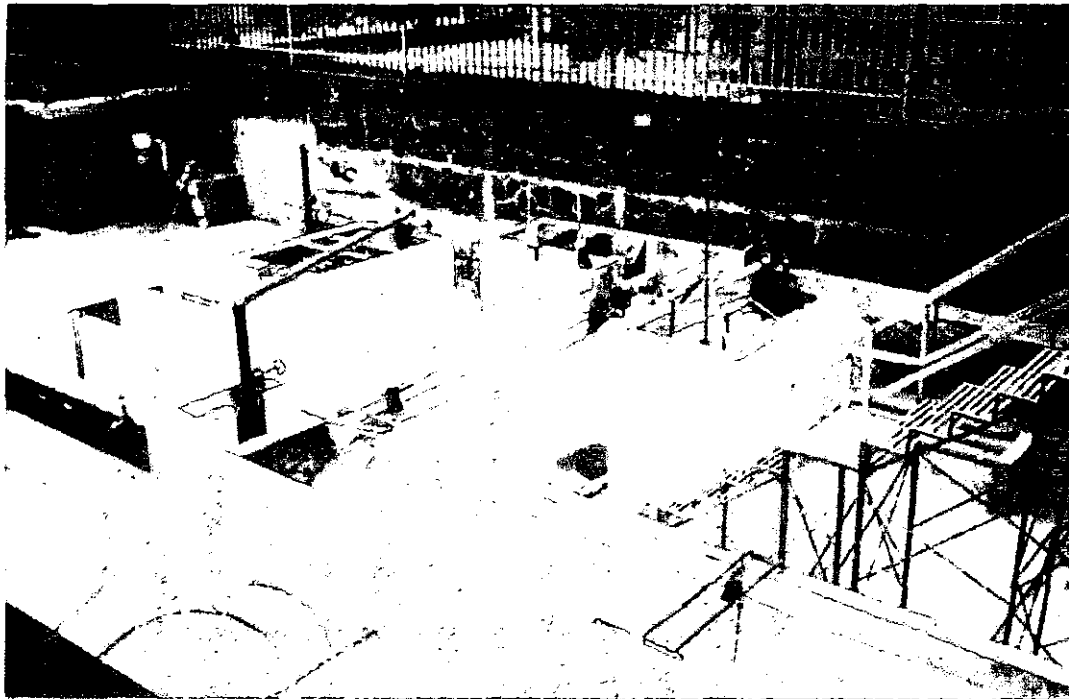


Figura 2.1. b) Vista aérea.

Figuras 2.1. a) y b) Estructura de Cauce Natural del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE AFORO.

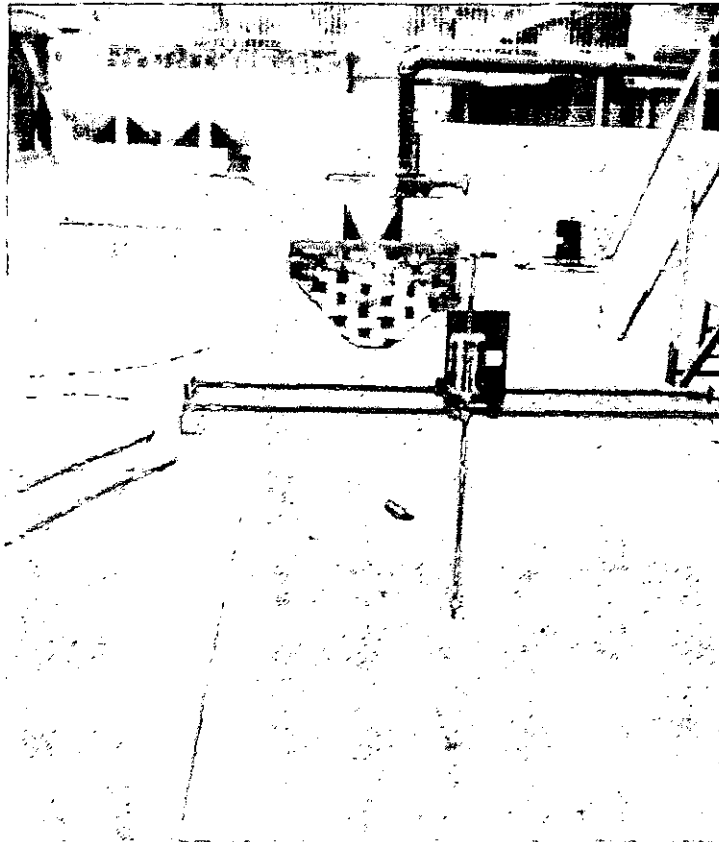
Existen diversas recomendaciones en cuanto a la elección del tramo de aforos para la correcta aplicación de los métodos de sección-velocidad, las cuales son de gran utilidad durante la operación de la estación, tanto para la calidad de los datos como para facilitar las labores y disminuir los gastos de mantenimiento. Sin embargo, debido a que el presente trabajo se realizó en una estructura de cauce natural, resultó que algunas de éstas recomendaciones no fueron aplicables a las condiciones que se tenían en dicho estructura. A continuación se enumeran las características del tramo de aforo y se señalan también las que no se cumplen ya sea parcialmente o en su totalidad:

- a) Ubicación. Como primera condición, la sección de aforo está situada en el tramo en que se desea conocer el régimen de la corriente. Algunas veces dentro de dicho tramo no hay un sitio adecuado y entonces se instala lo más cerca posible del mismo, procurando que no haya aportaciones o aprovechamientos entre uno y otro sitio; y en caso que los haya, se instalan estaciones también en ellos a fin de cuantificarlos.
- b) Estructura. Siempre que se desea aforar una corriente resulta necesario contar con alguna estructura que pueda servir como viaducto para cruzar la corriente. En los casos en que no se pueda aprovechar ninguna estructura ya existente, ésta se construye, en cuyo caso conviene elegir un sitio estrecho del cauce, a fin de que dicha estructura no resulte antieconómica. Para el caso en estudio, no fue necesario contar con dicha estructura, ya que el limnómetro se encuentra montado en una estructura metálica que abarca todo lo ancho de la superficie libre del cauce.
- c) Esguerramiento. El régimen del esguerramiento es lento, ya que no conviene que la velocidad del agua sea ni muy pequeña ni demasiado grande; en el primer caso porque el molinete no funciona o su funcionamiento es inadecuado, y en el segundo porque a grandes velocidades el aparato puede dañarse con los cuerpos extraños que transporta el agua, además que resulta casi imposible practicar sondeos y aun peligroso para los mismos aforadores (este problema no se presenta en el caso de la estructura, sin embargo se debe tener presente en la práctica profesional). En general puede decirse que las velocidades deben quedar comprendidas dentro de 0.10 y 2.50 m/s. Todas las velocidades obtenidas en los aforos de este trabajo, quedaron comprendidas dentro del rango recomendado.
- c) Tramo de aforo. El tramo de la corriente es recto y la sección transversal uniforme y regular, la forma de la misma es favorable para medir adecuadamente el caudal en todos los tirantes. La sección es totalmente impermeable. Sin embargo, no se cuenta con un tramo recto muy largo y la curva que se tiene aguas arriba puede tener efecto en la sección de aforo.



- e) Forma de la sección. El cauce tiene una amplitud tal que permite contener el gasto máximo del vertedor. Si la capacidad del cauce se reduce, parte del escurrimiento se desborda por las márgenes, con lo cual la relación escala-gasto se vuelve incierta. La forma ideal de la sección de un río en el que se va a instalar una estación hidrométrica es la de una "V", es decir, aquella que tiene taludes inclinados que se abren desde el centro del cauce hacia ambos lados, con lo cual se tienen mejores condiciones para medir los gastos pequeños, así como los mayores, dicha característica se cumple, ya que la sección transversal tiene dicha forma y se tiene una alta sensibilidad para pequeñas variaciones en la magnitud del gasto.
- f) Uniformidad y estabilidad del cauce. A lo largo del tramo recto del modelo no se tienen irregularidades ni obstrucciones que produzcan remolinos y turbulencias que afecten el escurrimiento y la precisión de los aforos.

Existen otras características que se deben tomar en cuenta para la elección del tramo de aforo, pero están estrechamente relacionadas con la sección de control (control y remanso), sin embargo en este caso no se requirió de su cumplimiento, ya que el objetivo es solamente el aforo y no la construcción de una estación de aforos. (Ref. 3)



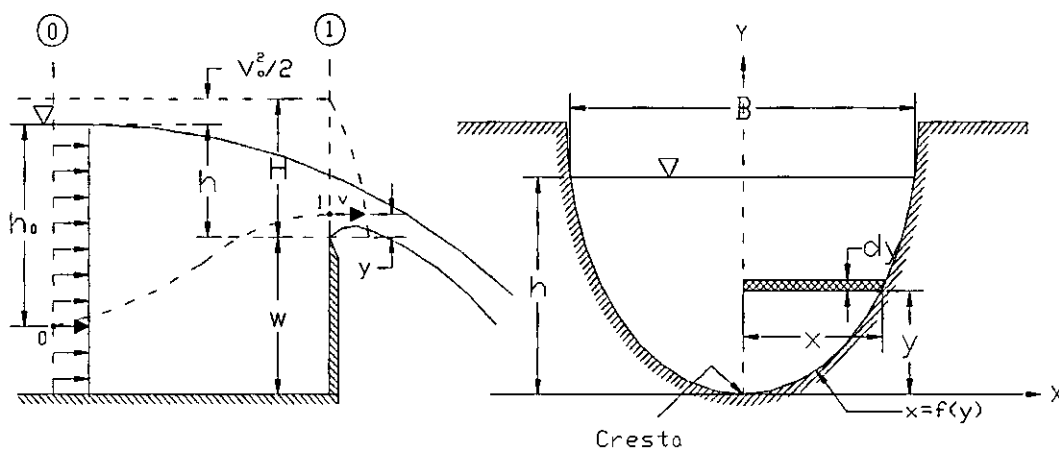
**Figura 2.2. Tramo de Aforo.**

## 2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS.

### 2.3.1. Vertedor triangular de pared delgada.

En el Capítulo I se mencionó la definición de vertedor y una clasificación general de éstos. En este Capítulo se describe específicamente el vertedor que se empleó para la realización del aforo. Dicho vertedor es de forma triangular y pared delgada.

A continuación, se muestra el esquema de un vertedor de pared delgada y la obtención de la ecuación general de gasto para este tipo de vertedores.



a) Elevación

b) Geometría de la sección

**Figura 2.3. Vertedor de pared delgada de forma general**

Para la figura anterior y aplicando la ecuación de la energía entre el inicio de la línea de corriente y el final de ésta, se tiene:

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_0 - h + y + \frac{v^2}{2g}$$

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g} = y + \frac{v^2}{2g} \quad 2.a$$

Si la carga de velocidad es despreciable, la velocidad en cualquier punto de la sección será:

$$v = \sqrt{2g(h - y)} \quad 2.b$$

De la figura 2.3. b), se deduce el gasto que pasa a través del área elemental, así:

$$dQ = 2\sqrt{2g} \mu x \sqrt{h - y} dy$$

En esta última ecuación el coeficiente  $\mu$  considera el efecto de contracción de la lámina vertiente. El gasto total vale:

$$Q = 2\sqrt{2g\mu} \int_0^h x(h-y)^{\frac{1}{2}} dy \quad 2.c$$

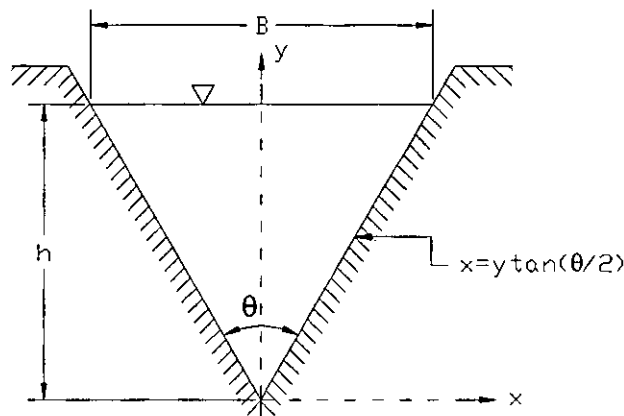
Esta última es la ecuación general de gasto para un vertedor de pared delgada, es posible integrar esta ecuación cuando se conoce la geometría del vertedor.

Se consideran algunas hipótesis aproximadas en la deducción de la ecuación: (Ref. 15)

- Se omite la pérdida de energía, incluida en el coeficiente  $\mu$ .
- En todos los puntos de la sección 1, las velocidades tienen dirección horizontal y con una distribución parabólica, efectuando la integración entre los límites 0 y  $h$ .
- Se supone una distribución hidrostática de presiones al aplicar la ecuación de Bernoulli entre las secciones 0 y 1. Esto se contrapone con la distribución parabólica utilizada para derivar la ecuación.
- El coeficiente  $\mu$  corrige la anterior suposición y representa la relación existente entre ambas distribuciones de velocidades.

### Vertedor triangular.

Cuando el vertedor es de sección triangular, simétrico con respecto del eje vertical y con ángulo en el vértice  $\theta$ , se tiene una ecuación del tipo  $x = y \tan(\theta/2)$ .



**Figura 2.4. Vertedor triangular de pared delgada.**

La ecuación general de gasto para vertedores de pared delgada se convierte en: (Ref. 15)

$$Q = 2\sqrt{2g\mu} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^h (h-y)^{\frac{1}{2}} y dy$$

Y si se integra por sustitución, haciendo  $z=h-y$  y entonces  $y=h-z$ ,  $dy=-dz$ . Los límites de integración serán para  $y=0$ ,  $z=h$  y para  $y=z$ ,  $z=0$ ; la ecuación anterior será entonces:

$$Q = -2\sqrt{2g}\mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_h^0 z^{1/2}(h-z) dz =$$

$$Q = -2\sqrt{2g}\mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ \frac{2hz^{3/2}}{3} - \frac{2}{5}z^{5/2} \right]_h^0$$

Sustituyendo en esta última ecuación los límites de integración, se obtiene:

$$Q = \frac{8}{15}\sqrt{2g}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\mu h^{5/2} \quad 2.d$$

De la misma forma que para el vertedor rectangular se puede hacer que:

$$Q = Ch^{5/2} \quad 2.e$$

$$C = \frac{8}{15}\sqrt{2g}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\mu$$

Diversos autores han propuesto fórmulas experimentales para el cálculo de  $C$  o  $\mu$ , debiéndose tomar en cuenta los límites de aplicación y observaciones que cada uno establece.

Una de las fórmulas más utilizadas es la de la Universidad Católica de Chile. Esta fórmula es la que mejor se ajusta a casi todos los vertedores triangulares del Laboratorio y será también la que se utilizará para el cálculo del gasto y la obtención de la curva de gastos, ya que el vertedor cumple con todos los límites de aplicabilidad que se señalan para su correcta aplicación. Por ello, en las figuras 2.5. Y 2.6., se presentan las gráficas para la obtención de los coeficientes  $\mu$  y  $K$  que requieren conocerse para la aplicación de esta fórmula.

A continuación se detalla la fórmula:

*Autor*

Universidad Católica de Chile.

*Fórmula.*

$$C = \frac{8}{15}\sqrt{2g}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\mu K \quad 2.f$$

*Límites de aplicación.*

Vale para  $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$

La profundidad  $w$  no tiene influencia en el coeficiente de gasto.

*Observaciones.*

$\mu$ , coeficiente experimental que depende de  $h$  y  $\theta$  según la figura 2.5.

K es otro coeficiente que depende de B/h según la figura 2.6. y vale 1 si  $B/h > 5$  para  $\theta = 90^\circ$  y si  $B/h > 2.75$  para  $\theta = 45^\circ$ .

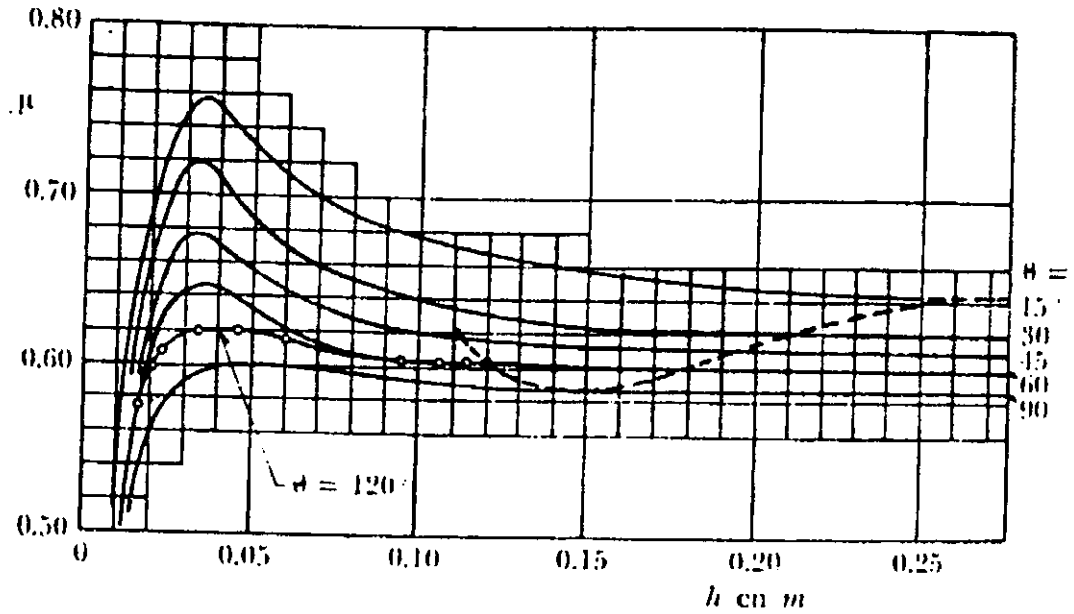


Figura 2.5. Gráfica para la obtención del coeficiente  $\mu$  para la aplicación de la fórmula de la Universidad Católica de Chile

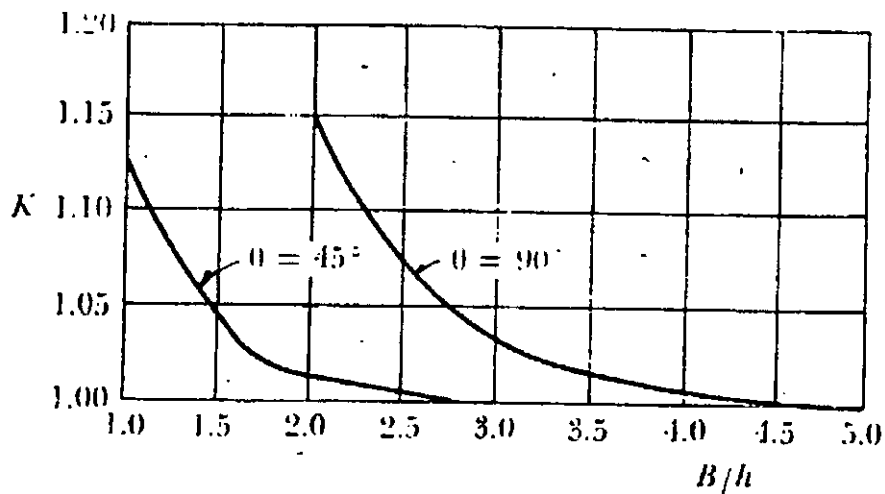


Figura 2.6. Gráfica para la obtención del coeficiente K para la aplicación de la fórmula de la Universidad Católica de Chile

### 2.3.2. MOLINETE.

En este trabajo se aplicó el método de aforo por medio de micromolinete, y es por ello que a continuación se describe en qué consiste.

#### Descripción.

El molinete hidráulico consiste esencialmente de dos partes principales que son: una rueda provista de un dispositivo, mediante el cual el agua en movimiento la hace girar, y un mecanismo que permite contar o medir el número de vueltas que da la citada rueda. (Ver figura 2.7.)

Generalmente, la rueda que gira lleva unas aspas o copas sobre las cuales el agua, al chocar, ejerce una fuerza que le imprime un movimiento de rotación, tanto más rápido cuanto mayor sea la velocidad de la corriente. Conociendo el número de vueltas que da la rueda y el tiempo empleado en darlas, se puede conocer la velocidad del agua con ayuda de una tabla calculada al efecto para cada rueda o molinete.

La determinación de la relación velocidad - No.de revoluciones se hace en un laboratorio especial, en el cual se mide, experimentalmente el tiempo en segundos que necesita la rueda para dar un número determinado de vueltas para diferentes velocidades, y con estos valores se forma la tabla citada, de la cual deberá estar provisto invariablemente cada molinete.

Para contar el número de vueltas que da la rueda, se utilizan diversos sistemas de acuerdo con el tipo del molinete, siendo el más práctico el eléctrico, que transmite una señal perceptible a un audífono, cada cierto número de vueltas de la rueda. Actualmente existen contadores del tipo digital, que acumulan el número de vueltas en una unidad de memoria, ahorrándole al aforador el trabajo de la contabilización por medio de audífonos.

El número de revoluciones de la rueda se obtiene a través de un circuito eléctrico colocado en una cámara de contactos. Los puntos de contacto del *switch* en la cámara están diseñados para completar un circuito eléctrico a frecuencias de revolución escogidas. Se pueden seleccionar cámaras en las que los puntos de contacto completan un circuito, uno por cada revolución (contacto simple) o uno por cada cinco revoluciones (contacto penta).

Además, a fin de que por sí solo se oriente convenientemente el aparato en la dirección del movimiento del agua, va provisto de un timón compuesto de dos hojas de lámina, una horizontal y otra vertical.

La suspensión y los elementos de transmisión son distintos para cada tipo de molinete, siendo los más empleados el *Price*, el *Ott*, etc.

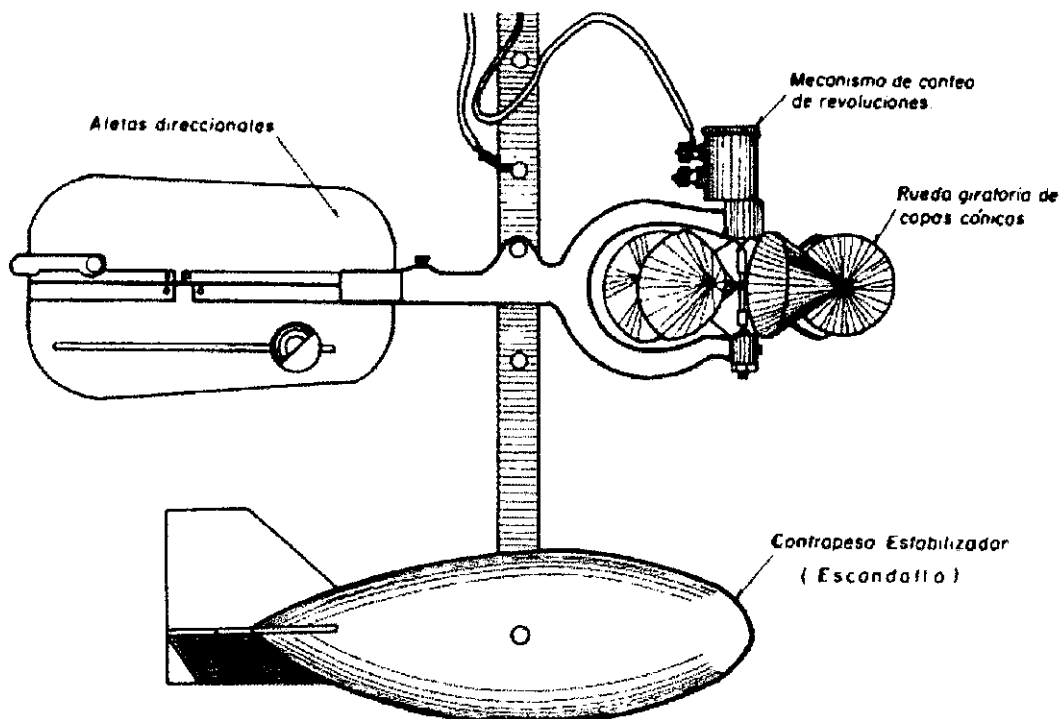
Los molinetes se pueden clasificar en dos tipos principales, que son: molinete con rueda de copas o aspas y eje vertical; y molinete con rueda de aspas y eje horizontal.

En este caso se empleó un molinete pigmeo (micromolinete) de copas o aspas y eje vertical, el cual tiene las siguientes características:

- a) Opera en velocidades de corrientes más bajas que los de eje horizontal.
- b) La rueda se puede reparar en campo, sin afectar notablemente su calibración.
- d) Una sola rueda sirve para todo el rango de velocidades.

El micromolinete es del tipo Price conocido como pigmeo, el cual tiene un tamaño de  $1/4$  a  $2/5$  partes de uno normal y no cuenta con timón. Este molinete pigmeo hace contacto a cada revolución y se emplea montado sobre una barra, que para el caso de estudio se montó sobre un limnómetro de punta.

En general, los molinetes de eje vertical no registran con precisión la velocidad en lugares cercanos a las paredes o bordos, debido a que en velocidades pequeñas el agua cercana a las paredes golpea contra la cara cóncava de las copas; esto también sucede cuando el molinete se coloca cercano a la superficie del agua o del fondo de la corriente.



**Figura 2.7. Molinete hidráulico con rueda de copas y eje vertical.**

### **Procedimiento.**

El aforo con molinete consta de dos operaciones, una de las cuales consiste en determinar el área de la sección y la otra en determinar la velocidad media.

### **Determinación del área de la sección.**

El método para determinar el área de la sección depende de las condiciones del cauce y de los elementos con que se cuenta. En cauces muy estables puede obtenerse previamente la forma de la sección de aforo con suficiente precisión, empleando un estadal y nivel montado, determinando las áreas correspondientes a cada una de las distintas alturas del agua, a fin de formar una tabla de alturas de escala-áreas, para que al practicar los aforos únicamente quede por determinarse la velocidad.

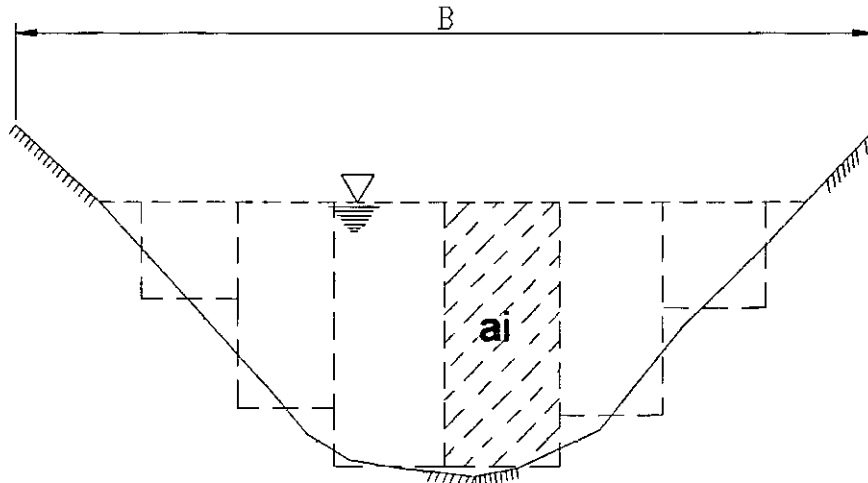
En caso que el cauce sea variable y el nivel de la corriente sufra cambios de consideración mientras se practica el aforo, el procedimiento consiste en ir midiendo sucesivamente las profundidades y las velocidades, a medida que se avanza de un punto a otro de la sección de aforo. Para esto, en la generalidad de los casos, se utiliza en la determinación de las profundidades, el molinete suspendido llevando el escandallo en vez de la senda; en las corrientes de poca profundidad o cuando se afora vadeando, se emplea el molinete montado en su varilla, cuidando de poner en el extremo inferior de ésta la zapata de asiento.

Este procedimiento combinado resulta ventajoso, puesto que reduce el número de útiles y de operaciones, siendo, por lo tanto, el más comúnmente empleado, pero debe evitarse en las corrientes muy profundas y en las impetuosas, por la probabilidad que existe de incurrir en grandes errores y de dañar el molinete.

Es importante destacar que en el caso del cauce natural estudiado, la obtención de la batimetría de la sección transversal de aforo, se hizo por medio de un limnómetro de punta, con el cual se pudo obtener la relación de alturas de escala-áreas; dicha relación permanece constante ya que no se presenta arrastre de sedimentos y por ende es correcto considerar que no se tienen variaciones en la sección transversal del cauce.

En la siguiente figura se pueden observar los elementos que se deben de tomar en cuenta cuando se realiza un levantamiento topográfico de una sección cualquiera en un cauce, así como la obtención de dovelas para la correcta aplicación del aforo con molinete.





**Figura 2.8. Batimetría y obtención de dovelas en la sección transversal de un cauce natural.**

### **Determinación de la velocidad.**

Los métodos para obtener la velocidad media en cada fracción o dovela, empleando el molinete, se diferencian esencialmente por la profundidad a la cual se hacen las mediciones de la velocidad en la vertical. Los más empleados son: (Ref. 3)

**Método de los 6/10.** El método más sencillo consiste en colocar el molinete a los 6/10 de la profundidad, contados a partir de la superficie del agua hacia el fondo y en el centro de cada fracción. Este procedimiento, descrito en el Capítulo I, se basa en que a la profundidad citada, la velocidad del agua es muy semejante a la velocidad media en la vertical en que se está haciendo la observación.

En la figura 2.9. se puede observar gráficamente el criterio o método de los 6/10 para la obtención de la velocidad media:

**Método de los 2/10 y 8/10.** Cuando se desea obtener mayor aproximación, se practican, si la profundidad es suficiente dos medidas: una a los 2/10 y la otra a los 8/10, contados a partir de la superficie, y sobre la vertical que pasa por el centro de la fracción, y el promedio de ambas medidas será la velocidad media. En general empleando este método se obtiene mayor precisión que con el de los 6/10.

Los dos métodos anteriores se basan en las propiedades del arco de parábola a la cual se asemeja la curva representativa de las velocidades en una vertical. (Ver figura 2.9.)

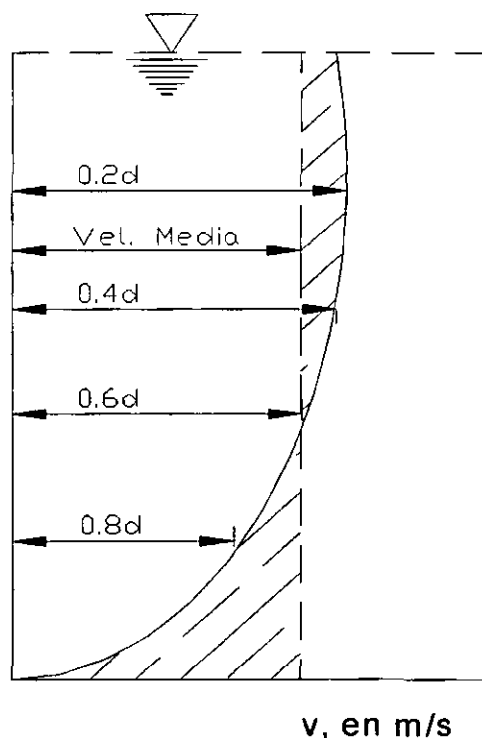
**Método de varios puntos.** Cuando se desea mas precisión, siempre que la profundidad de la corriente sea mayor de 3.00 m, y las condiciones del escurrimiento lo permitan, se puede practicar un número mayor de observaciones

sobre la vertical que pasa por el centro de la fracción, efectuando una cerca de la superficie, otra cerca del fondo y entre una y otra un cierto número de observaciones, de tal manera que los intervalos sean de  $1/4$  a  $1/10$  de la profundidad, sin que el mayor espaciamiento exceda de 1.00 m.

Debe tenerse cuidado que en las observaciones superficiales las aspas no sobresalgan del agua y en las del fondo, no lleguen a tocar el mismo.

**Método de superficie.** Cuando la velocidad del agua es mayor de 2.50 m/s es preferible prescindir de las observaciones profundas, tanto por la dificultad de mantener el molinete en posición correcta, como por el peligro de que sufra desperfectos por golpes de los cuerpos que acarrea la corriente.

En estos casos basta hacer observaciones superficiales, a unos 0.15 m abajo del nivel del agua, evitando que el molinete sea golpeado por los cuerpos flotantes.



**Figura 2.9. Distribución de velocidades en la vertical de una sección.**

### 2.3.3. ELECTROMAGNÉTICO.

En el Capítulo I se describió someramente el método electromagnético, el cual se basa en el principio de Faraday. A continuación se detalla dicho principio, así como la descripción general del medidor y la aplicación del método.

#### **Electromagnetismo.**

Los conceptos elementales del magnetismo, basados en la existencia de pares de polos opuestos, aparecieron en el siglo XVII y fueron desarrollados en los trabajos de Coulomb. Sin embargo, la primera conexión entre el magnetismo y la electricidad se encontró en los experimentos del físico y químico danés Hans Christian Oersted, que en 1819 descubrió que un cable conductor por el que fluía una corriente eléctrica desviaba una aguja magnética situada en sus proximidades. A la semana de conocer el descubrimiento de Oersted, el científico francés André Marie Ampère demostró experimentalmente que dos cables por los que circula una corriente ejercen una influencia mutua igual a la de los polos de un imán. En 1831, el físico y químico británico Michael Faraday descubrió que podía inducirse el flujo de una corriente eléctrica en un conductor en forma de espira no conectado a una batería, moviendo un imán en sus proximidades o situando cerca otro conductor por el que circulara una corriente variable. La forma más fácil de enunciar la íntima relación entre la electricidad y el magnetismo, perfectamente establecida en la actualidad, es a partir de los conceptos de campo eléctrico y magnético. La intensidad, dirección y sentido del campo en cada punto mide la fuerza que actuaría sobre una carga unidad (en el caso del campo eléctrico) o una corriente unidad (en el caso del campo magnético) situadas en ese punto. Las cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos; las corrientes, esto es, las cargas en movimiento, producen campos eléctricos y magnéticos. Un campo eléctrico también puede ser producido por un campo magnético variable, y viceversa. Los campos eléctricos ejercen fuerzas sobre las partículas cargadas por el simple hecho de tener carga, independientemente de su velocidad; los campos magnéticos sólo ejercen fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento.

El movimiento de la aguja de una brújula en las proximidades de un conductor por el que circula una corriente indica la presencia de un campo magnético alrededor del conductor. Cuando dos conductores paralelos son recorridos cada uno por una corriente, los conductores se atraen si ambas corrientes fluyen en el mismo sentido y se repelen cuando fluyen en sentidos opuestos. El campo magnético creado por la corriente que fluye en una espira de alambre es tal que si se suspende la espira cerca de la Tierra se comporta como un imán o una brújula, y oscila hasta que la espira forma un ángulo recto con la línea que une los dos polos magnéticos terrestres.

Puede considerarse que el campo magnético en torno a un conductor rectilíneo por el que fluye una corriente se extiende desde el conductor igual que

las ondas creadas cuando se tira una piedra al agua. Las líneas de fuerza del campo magnético tienen sentido antihorario cuando se observa el conductor en el mismo sentido en que se desplazan los electrones. El campo en torno al conductor es estacionario mientras la corriente fluya por él de forma uniforme.

### **Descripción general de un medidor electromagnético.**

Dicho medidor consta de tres elementos principales:

- **Electroimán.**

Dispositivo que consiste en un solenoide (una bobina cilíndrica de alambre recubierta de una capa aislante y arrollado en forma de espiral), en cuyo interior se coloca un núcleo de hierro. Si una corriente eléctrica recorre la bobina, se crea un fuerte campo magnético en su interior, paralelo a su eje. Al colocar el núcleo de hierro en este campo los dominios microscópicos que forman las partículas de hierro, que pueden considerarse pequeños imanes permanentes, se alinean en la dirección del campo, aumentando de forma notable la fuerza del campo magnético generado por el solenoide. La imantación del núcleo alcanza la saturación cuando todos los dominios están alineados, por lo que el aumento de la corriente tiene poco efecto sobre el campo magnético. Si se interrumpe la corriente, los dominios se redistribuyen y sólo se mantiene un débil magnetismo residual.

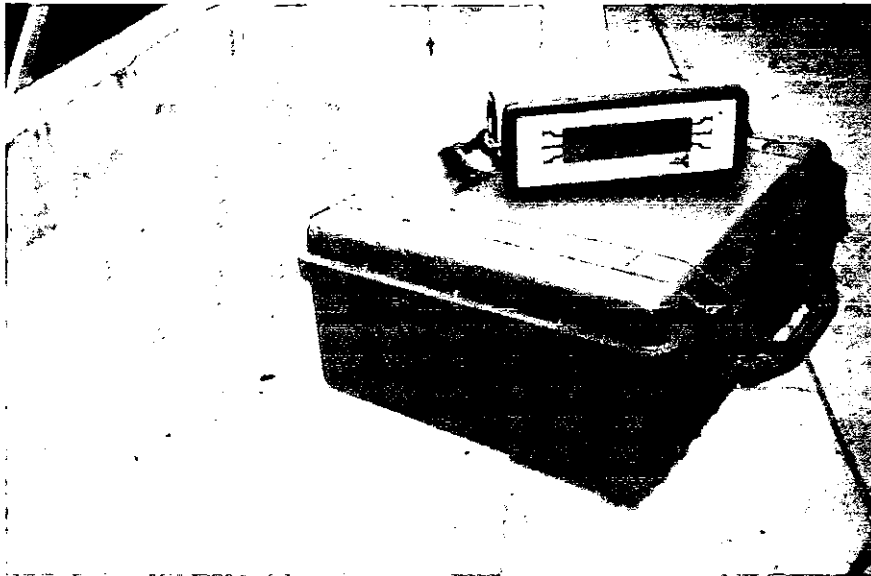
- **Un sensor con un par de electrodos.**

Un electrodo es un componente de un circuito eléctrico que conecta el cableado convencional del circuito a un medio conductor como un electrólito o un gas. El electrodo de carga positiva se denomina ánodo y el de carga negativa cátodo.

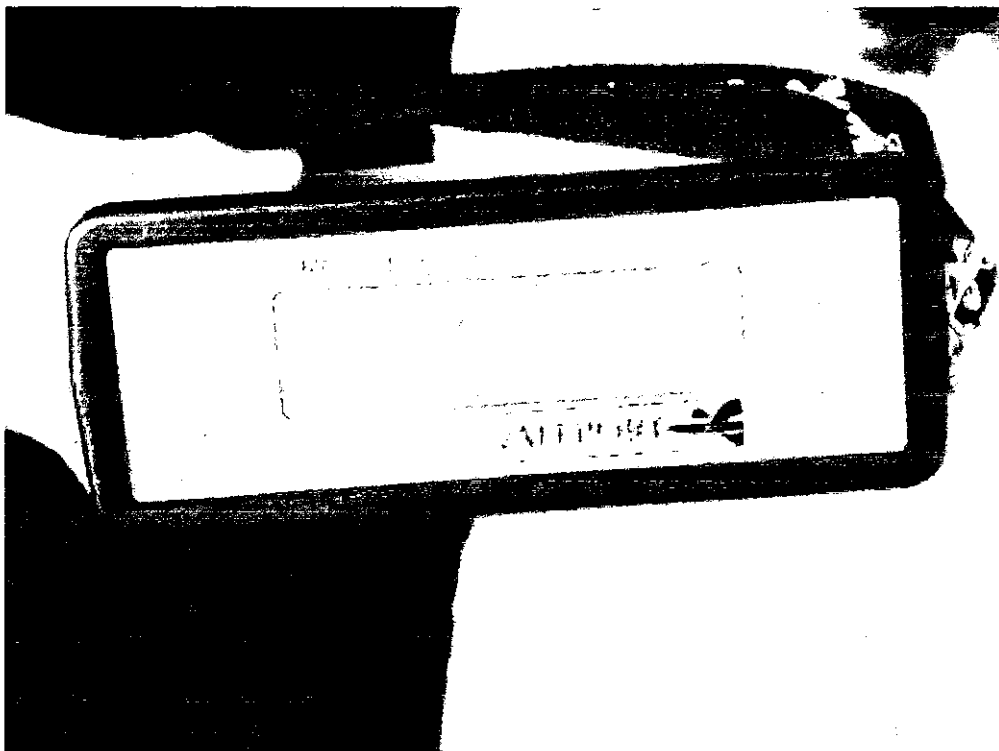
- **Unidad de control.**

Es un dispositivo electrónico que indica el valor de la velocidad, Dicho dispositivo puede presentar otros parámetros de interés (desviación estándar, velocidad promedio en un cierto periodo, diversas unidades, etc.). Dichos parámetros varían de acuerdo al modelo o marca del medidor. (Figura 2.10.)

A continuación se describen las características del medidor que se empleó para llevar a cabo el aforo; así como el principio bajo el que opera y la obtención de los parámetros de interés (velocidad y sección transversal del cauce). En la figura 2.11. se presenta el medidor empleado.



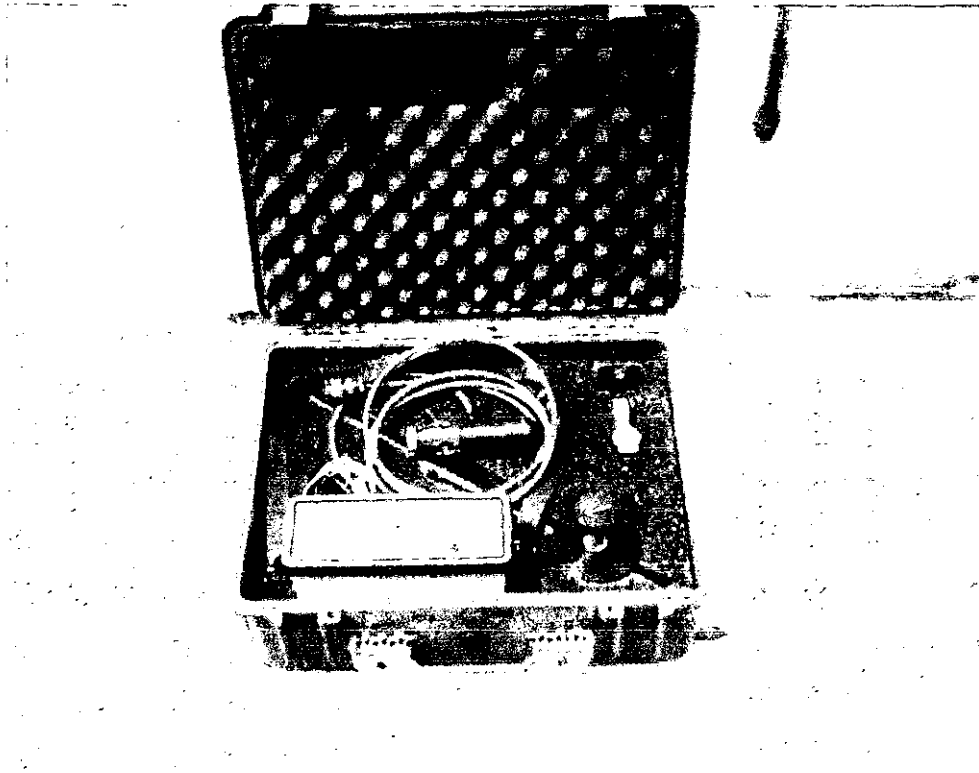
**Figura 2.10. a)**



**Figura 2.10. b)**

**Figuras 2.10. a) y b) Unidad de control del medidor empleado.**

El dispositivo consiste esencialmente de las partes descritas anteriormente (electroimán, sensor y unidad de control). La forma en que funciona es la siguiente: crea un campo electromagnético producido por el electroimán, entonces el flujo de agua genera una diferencia de voltaje, debido al fenómeno de inducción (descubierto por el científico e inventor británico Michael Faraday en 1831, el cual dice que si un conductor se mueve a través de un campo magnético, o si está situado en las proximidades de un circuito de conducción fijo cuya intensidad puede variar, se establece o se induce una corriente en el conductor).



**Figuras 2.11. Medidor de flujo electromagnético empleado**

El medidor cuenta con un sensor en el cual se encuentran colocados un par de electrodos, los cuales miden la diferencia de voltaje que se produce debido al fenómeno mencionado anteriormente.

El sistema opera en cualquier fluido con capacidad de conductividad (agua limpia, salina o residual), y es importante mencionar que no se requiere calibrar para las diversas condiciones de flujo que se presenten. Está calibrado como una combinación de sensor con componentes electrónicos en la unidad de control.

De acuerdo a las condiciones del cauce, el medidor cuenta con dos tipos de sensores:

Sensor cilíndrico, el cual tiene los electrodos a un lado y el volumen de monitoreo es una esfera alrededor del cuerpo del sensor de aproximadamente 120 mm de diámetro. Debido al relativamente gran volumen monitoreado, el sensor cilíndrico no se debe usar para situaciones en que los límites del agua (fondo, lados o superficie) estén cercanas a los 40 mm a partir del contorno del sensor.

Sensor plano, éste tiene los electrodos en la superficie, así que el flujo se mide por arriba de la superficie del sensor. Es evidente que el volumen de muestreo será mucho menor que en el caso del sensor cilíndrico y por lo tanto es de gran utilidad en los casos en que se requiere medir la velocidad en las cercanías del fondo, paredes o superficie del cauce, o bien cuando se tienen condiciones de flujo con demasiada turbulencia. El volumen del muestreo es un cilindro pequeño, cuyo diámetro es la distancia entre los electrodos, y cuya altura se extiende aproximadamente 10 mm por encima de la superficie del sensor.

### **Procedimiento.**

El aforo por medio de medidor electromagnético consta al igual que con molinete de dos operaciones, una de las cuales consiste en determinar el área de la sección y la otra en determinar la velocidad media.

En cuanto al área de la sección, se obtuvo una sola vez la relación escala-área, dicha relación es válida tanto para el molinete como para el medidor electromagnético, ya que se empleó la misma sección del cauce para la aplicación de ambos métodos.

La determinación de la velocidad media se hizo mediante la obtención de tres dovelas, y a diferencia del molinete, solamente se empleo el método de los 6/10 en cada una de ellas.

El medidor empleado hace una doble medición cada segundo y calcula la velocidad real del flujo cada segundo como un promedio de las dos lecturas. La velocidad promedio (puntual) es calculada como el promedio del valor de un segundo en tiempo real durante el período para el cual ha sido programado (períodos máximos de 600 segundos).

La desviación estándar (DE) da una indicación de la calidad de las mediciones. Una alta desviación estándar indica una alta variación en el flujo o que el sondeo no ha sido llevado a cabo de manera correcta durante la medición (se debe de asegurar que el sensor esté alineado a la dirección del flujo).

En el aforo, se registró el valor de velocidad puntual que presentó la menor desviación estándar, esto gracias a que la unidad de control muestra simultáneamente el valor de la velocidad y la desviación. Por lo tanto se puede tener la certeza de tener valores muy precisos.



**Figura 2.12. Registro de velocidades con medidor electromagnético.**



## CAPÍTULO III

**APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS.**

El objetivo de este capítulo, es aforar el gasto del cauce natural, aplicando los métodos: Electromagnético, Molinete y Vertedor descritos en el capítulo anterior. En la primera parte de este capítulo se presentan: la batimetría de la sección de aforo empleada, la calibración en el caso de los dispositivos que lo requirieron, los valores obtenidos para cada una de las variables que intervienen en cada uno de los métodos aplicados y los resultados obtenidos. En la segunda parte del capítulo, se realiza el análisis de los resultados obtenidos y se presentan las tablas y curvas de gastos que corresponden a cada método.

**3.1. BATIMETRÍA DE LA SECCIÓN DE AFORO.**

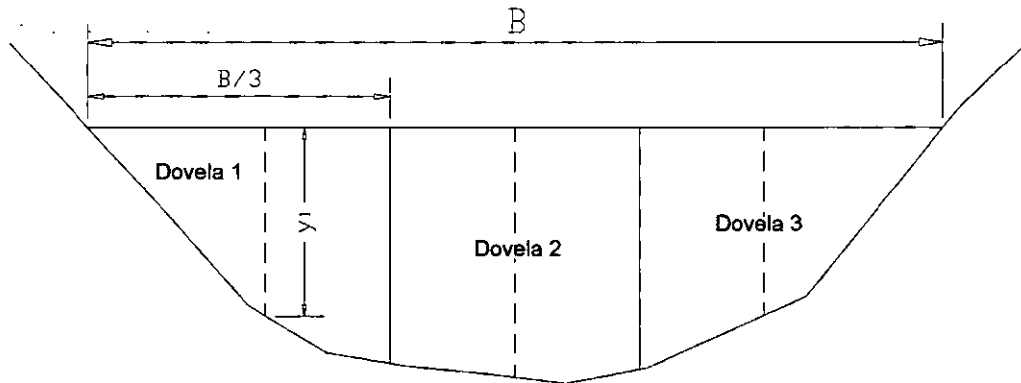
Una vez elegido el tramo de aforo con base en las recomendaciones descritas en la primer parte del capítulo anterior, se procede a la obtención de la batimetría de la sección. Que como ya se indicó, para el caso del presente trabajo se hizo por medio de un limnómetro de punta, por las dimensiones de la estructura, no fue necesario el uso de estadal y nivel.

En la siguiente tabla se presenta el registro de las coordenadas de la sección transversal. Como se observa en las orillas de ésta se tomaron mediciones a cada 10 cm de ancho, mientras que en la parte central se tomaron a cada 5 cm, con el propósito de lograr una mejor aproximación en el cálculo del área transversal del cauce en estudio.

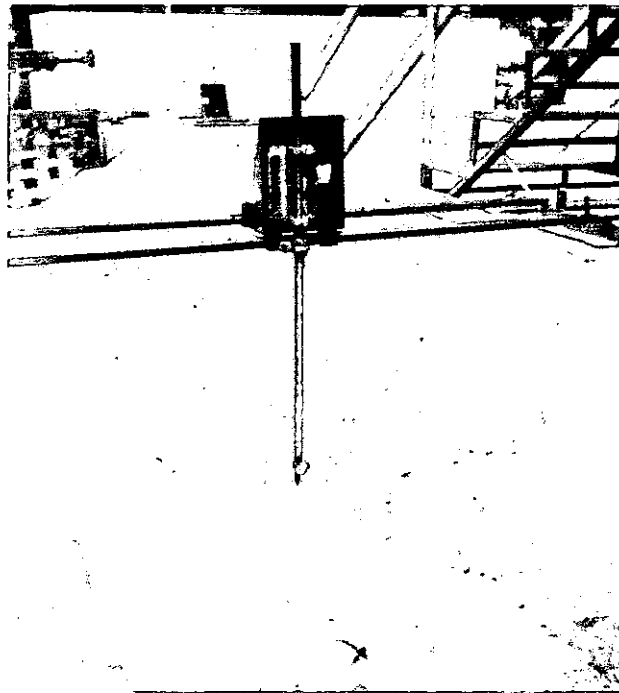
x [cm]	$l_{inf}$ [cm]	$l_{sup}$ [cm]	y [cm]
0.00	42.28	42.28	0.00
10.00	33.28	42.28	9.00
20.00	22.56	42.28	19.72
30.00	11.74	42.28	30.54
35.00	6.03	42.28	36.25
40.00	3.01	42.28	39.27
45.00	2.18	42.28	40.10
50.00	1.69	42.28	40.59
55.00	1.63	42.28	40.65
60.00	2.59	42.28	39.69
70.00	7.08	42.28	35.20
80.00	19.22	42.28	23.06
90.00	28.72	42.28	13.56
100.00	39.22	42.28	3.06
103.00	42.28	42.28	0.00

**Tabla 3.1. Cotas de la batimetría de la sección de aforo.**

Haciendo uso de un programa de diseño asistido por computadora, finalmente se obtuvo la batimetría de la sección; la cual se muestra en la figura 3.1. a). También se observa la división de la sección en tres dovelas (el número de dovelas depende de las dimensiones del río y sobre todo de la variación de la velocidad en la sección transversal). Se indica la ubicación de tirantes al centro de cada una. En los dos métodos de sección-velocidad (molinete y medidor electromagnético) se empleó la misma división.



**Figura 3.1. a) Batimetría.**



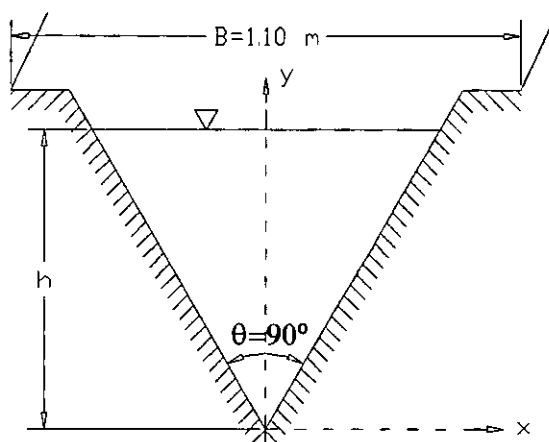
**Figura 3.1. b)**

**Figuras 3.1. a) y b) Sección de aforo.**

En este caso, no se obtuvo la tabla de alturas de escala-áreas, ya que se trabajó por medio de dovelas, es decir, se obtuvo una velocidad media por dovela y un gasto parcial para cada una de éstas.

### 3.2. VERTEDOR TRIANGULAR DE PARED DELGADA.

A continuación se presentan las características geométricas del vertedor triangular empleado para el aforo, figura 3.2. Se encontró que con base en lo anterior, el criterio de la Universidad Católica de Chile, es en efecto el que más se ajusta para el cálculo del coeficiente de gasto  $C$ . Para este caso, se midieron siete cargas sobre el vertedor y una vez determinado el proceso de cálculo y los criterios a emplear en el Capítulo II; se presenta la tabla de cálculo de los gastos (tabla 3.2).



**Figura 3.2. Características geométricas del vertedor.**

Datos y fórmulas:

$$q = 90.0^\circ$$

$$B = 1.10 \text{ m}$$

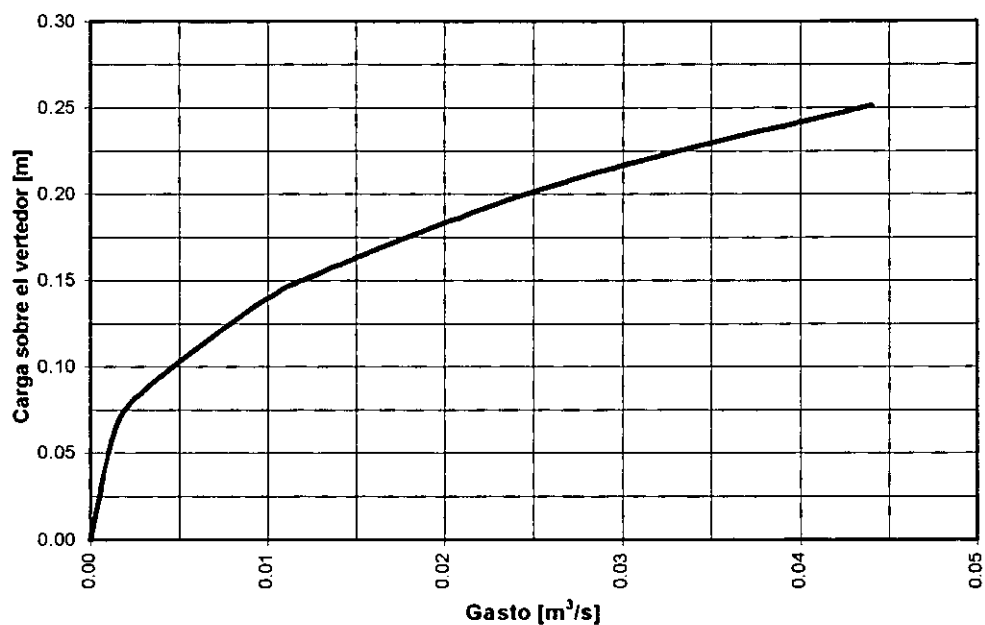
$C$  = Fórmula de la Universidad Católica de Chile

$$Q = Ch^{5/2} \text{ m}^3/\text{s}$$

$h_{\text{tara}}$ [m]	$h_{\text{lim}}$ [m]	$h$ [m]	$\mu$ [o]	$b/h$ [o]	$K$ [o]	$C$ [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]	$Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
0.246	0.2460	0.000	-	-	-	0.0000	0.0000
0.246	0.3098	0.064	0.600	17.241	1.000	1.4174	0.0015
0.246	0.3342	0.088	0.595	12.472	1.000	1.4056	0.0032
0.246	0.3810	0.135	0.586	8.148	1.000	1.3843	0.0093
0.246	0.3988	0.153	0.585	7.199	1.000	1.3820	0.0126
0.246	0.4395	0.194	0.585	5.685	1.000	1.3820	0.0228
0.246	0.4660	0.220	0.585	5.000	1.000	1.3820	0.0314
0.246	0.4970	0.251	0.585	4.382	1.010	1.3958	0.0441

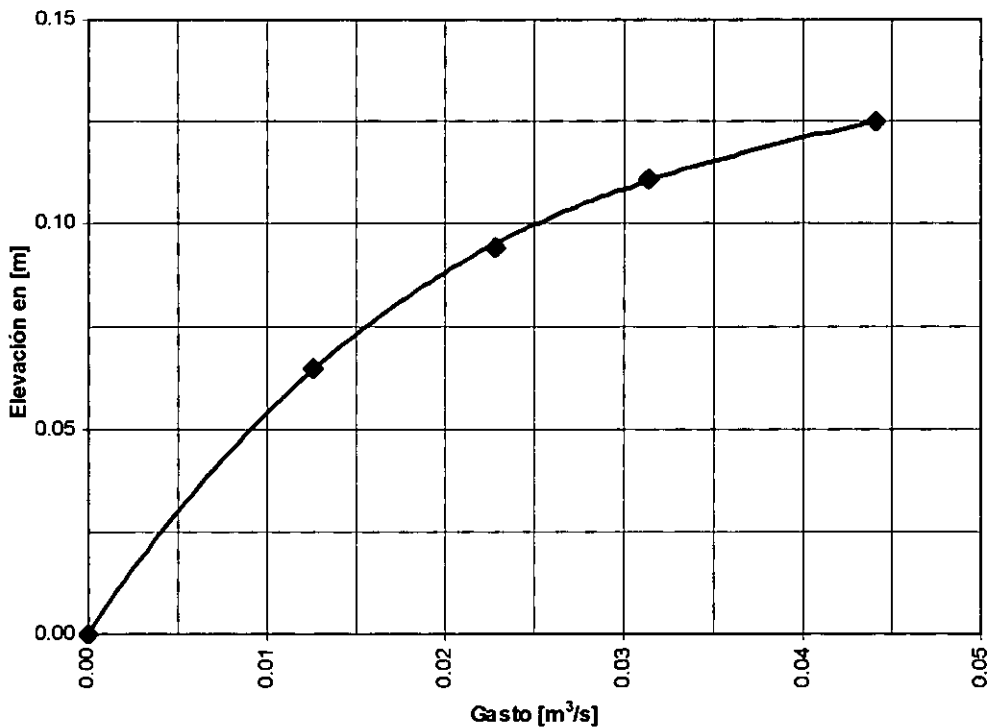
**Tabla 3.2. Tabla de cálculo de la curva de gasto del vertedor triangular.**

A partir de la tabla 3.2. se construyó la curva de gastos para el vertedor.



**Figura 3.3. Curva de gastos del vertedor triangular.**

A partir de los gastos obtenidos en el vertedor, se puede establecer una relación entre éstos y el tirante medido en la sección de aforo para cada uno de ellos.



**Figura 3.4. Curva elevaciones-gastos del río empleando el vertedor triangular.**

Se puede observar inmediatamente, que el comportamiento de la curva de gastos del vertedor y la del cauce son distintos, ya que los mismos gastos se relacionan, para el primer caso con la carga sobre el vertedor y para el segundo con las elevaciones en el cauce.

### 3.3. MOLINETE.

Como se indicó, el molinete es un aparato que tiene por objeto, ayudar a medir la velocidad puntual del agua y posteriormente con el empleo de ciertos criterios se obtiene la velocidad media en la sección de aforo. A continuación se describe su calibración y la obtención de la curva elevaciones-gastos.

#### 3.3.1. Calibración.

Debido a que los molinetes son aparatos delicados y de gran sensibilidad, es necesario verificar periódicamente su precisión; ya que el uso y deterioro normales provoca cambios en la constante de calibración.

Es por ello que fue necesario tararlo, es decir, determinar la relación entre el número de revoluciones y la correspondiente velocidad del agua. Por lo tanto, el objetivo es encontrar la constante de calibración ( $K$ ) del micromolinete.

La estructura que se usó es un canal con pendiente nula ( $S_0=0$ ) y sección rectangular (figura 3.5.) . El cual cuenta con un vertedor triangular de pared delgada. Gracias a éste, se puede igualar el gasto en el canal con el del vertedor (figura 3.6.) , de tal forma que la única incógnita que se tiene es precisamente la constante del micromolinete.

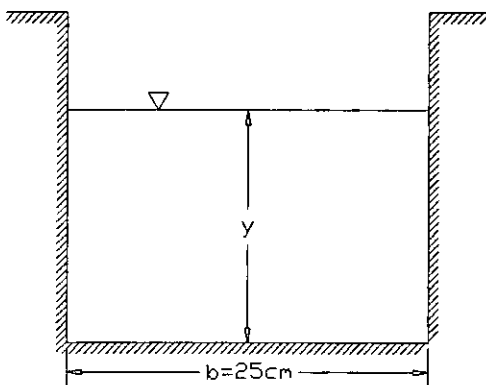


Figura 3.5. Sección canal.

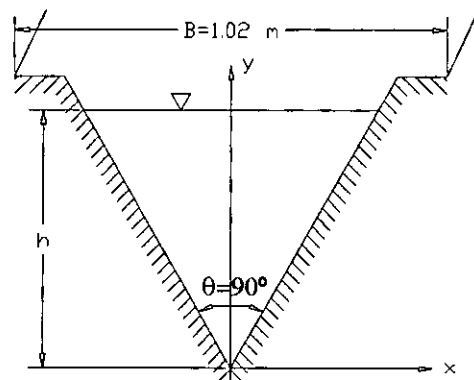


Figura 3.6. Vertedor del canal.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se establecieron 3 gastos distintos en el canal.
2. Para cada gasto se midió:
  - a) La carga en el vertedor.
  - b) El tirante en el canal.
  - c) El tiempo para determinado número de golpes en el micromolinete, a profundidades de 0.2, 0.6 y 0.8 del tirante.

Datos y fórmulas:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{tara}} &= 15.3 \text{ cm} \\
 B &= 102.0 \text{ cm} \\
 a_1 &= 60.0 \text{ cm} \\
 a_2 &= 43.0 \text{ cm} \\
 b &= -25.0 \text{ cm} \\
 S_0 &= 0.0
 \end{aligned}$$

Al despejar  $K$  se obtiene:

$$K = \frac{Q * t}{\# \text{ golpes} * A} \quad 3.a$$

donde:

$K$  es la constante de calibración del micromolinete

$Q$  es el gasto en el vertedor triangular

$A$  es el área hidráulica en el canal

$\# \text{ golpes}$  es el número de golpes registrados

$t$  es el tiempo transcurrido para el número de golpes.

$h_{\text{lim}} [\text{cm}]$	$l_{\text{inf}} [\text{cm}]$	$l_{\text{sup}} [\text{cm}]$	$y [\text{cm}]$	0.2y	0.6y	0.8y
37.57	24.94	41.84	16.90	3.38	10.14	13.52
40.95	24.94	45.96	21.02	4.20	12.61	16.82
43.70	24.94	50.20	25.26	5.05	15.16	20.21

**Tabla 3.3. a) Cargas en el vertedor, tirantes y profundidades en el canal.**

$h_v$ [cm]	0.2y		0.6y		0.8y	
	#golpes	t [s]	#golpes	t [s]	#golpes	t [s]
22.27	5.00	24.00	5.00	21.87	5.00	22.40
	5.00	23.64	5.00	22.38	5.00	22.28
25.65	5.00	19.65	5.00	19.46	5.00	18.13
	5.00	20.00	5.00	19.26	5.00	18.27
28.40	5.00	18.27	5.00	18.72	5.00	17.71
	5.00	18.47	5.00	18.50	5.00	17.56

Figura 3.3. b) Registro del número de golpes y tiempo para diferentes profundidades y cargas.

$h_v$ [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	y [m]	A [m <sup>2</sup> ]	0.2y	0.6y	0.8y	(0.2y+0.8y)/2
				K			
0.223	0.033	0.169	0.042	3.741	3.474	3.508	3.624
0.257	0.047	0.210	0.053	3.564	3.480	3.271	3.417
0.284	0.061	0.253	0.063	3.544	3.591	3.403	3.474

Tabla 3.3. c) Cálculo de la constante del micromolinete para diferentes gastos.

Como se observa en la tabla.3.3. c), existen 3 valores de K muy similares, sin embargo, es más adecuado tomar como valor real de K, la media aritmética de la muestra:

$$K = 3.51$$

Por lo que la ecuación para determinar la velocidad puntual, que corresponde a este aparato en particular es la siguiente:

$$v = \frac{K \cdot \# \text{ golpes}}{t} = \frac{3.51 \cdot \# \text{ golpes}}{t} \quad 3.b$$

### 3.3.2. Cálculo de la curva de gastos.

El aforo con molinete consta de dos operaciones: área de la sección y velocidad media, los cuales ya se explicaron en el capítulo anterior. A continuación se presenta el registro de aforo con molinete para cuatro elevaciones en el cauce, dicho registro contiene todos los elementos necesarios para el cálculo de la curva de gastos con dicho método. El formato de registro se tomó del propuesto por la Comisión Nacional del Agua en su manual para aforo de corrientes. En el caso de la obtención de áreas, se hizo por medio de *Auto CAD*.

Tabla 3.5. REGISTRO DE AFORO Y CÁLCULO DE GASTOS CON MICROMOLINETE

Elevación 1										
SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD				Observaciones
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		#golpes	Tiempo	Tiempo medio	En el punto	Media del tramo	Área	
m	m	Método	m		segundos	segundos	m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
0.0780	0.0920	0.6	0.0552	10.0	41.06	41.2800	0.8421	0.8421	0.0120	0.01014
					41.50	32.5750				
0.2340	0.1250	0.2	0.0250	10.0	23.65	23.3250	1.4902	1.1772	0.0192	0.02262
					23.00					
		0.8	0.1000	10.0	39.50	40.2200	0.8642			
					40.94					
0.3900	0.0880	0.6	0.0528	10.0	27.58	27.5500	1.2617	1.2617	0.0124	0.01567
					27.52					
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>										<b>0.04842</b>

Se dividió la sección transversal del cauce en tres dovelas. En las dovelas laterales se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad. En el caso de la dovola central se obtuvo como promedio de las de 0.2 y 0.8 de profundidad

Elevación 2										
SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD				Observaciones
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		# golpes	Tiempo	Tiempo medio	En el punto	Media del tramo	Área	
m	m	Método	m		segundos	segundos	m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
0.0763	0.0800	0.6	0.0480	10.0	47.56	48.0950	0.7227	0.7227	0.0099	0.00713
					48.63					
0.2288	0.1110	0.2	0.0222	10.0	35.63	35.1550	0.9888	0.9276	0.0170	0.01580
					34.68					
		0.8	0.0888	10.0	39.65	40.1150	0.8665			
					40.58					
0.3813	0.0770	0.6	0.0462	10.0	37.85	36.6550	0.9483	0.9483	0.0102	0.00971
					35.46					
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>										<b>0.03263</b>

Se dividió la sección transversal del cauce en tres dovelas. En las dovelas laterales se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad. En el caso de la dovola central se obtuvo como promedio de las de 0.2 y 0.8 de profundidad



Tabla 3.5. REGISTRO DE AFORO Y CÁLCULO DE GASTOS CON MICROMOLINETE

Elevación 3											
SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD				Observaciones	
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		# golpes	Tiempo	Tiempo medio	En el punto	Media del tramo	Área		Gasto parcial
m	m	Método	m		segundos	segundos	m/s	m/s	m <sup>2</sup>		m <sup>3</sup> /s
0.0683	0.0546	0.6	0.0328	10.0	50.20	50.7800	0.6845	0.6845	0.0062	0.00422	Se dividió la sección transversal del cauce en tres dovelas. En las tres dovelas se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad.
					51.36						
0.2048	0.0941	0.6	0.0565	10.0	35.35	35.4550	0.9804	0.9804	0.0145	0.01421	
					35.56						
0.3413	0.0520	0.6	0.0312	10.0	39.56	40.0400	0.8681	0.8681	0.0064	0.00556	
					40.52						
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>										<b>0.02400</b>	

Elevación 4											
SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD				Observaciones	
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		# golpes	Tiempo	Tiempo medio	En el punto	Media del tramo	Área		Gasto parcial
m	m	Método	m		segundos	segundos	m/s	m/s	m <sup>2</sup>		m <sup>3</sup> /s
0.1040	0.0650	0.6	0.0390	10.0	42.36	42.0250	0.8271	0.8271	0.0160	0.01320	No se dividió la sección transversal en dovelas. Se consideró como velocidad media la del punto a 0.6 de profundidad.
					41.69						
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>										<b>0.01320</b>	

En el caso de la curva de gastos aplicando el método de aforo con molinete, no fue posible obtener la curva completa ya que para elevaciones muy pequeñas resulta imposible medir con el molinete a pesar de tratarse de un micromolinete, así es que se obtuvo la curva a partir de la elevación de 6.5 cm al centro de la sección transversal del cauce. Del origen a este punto se siguió la tendencia de la curva.

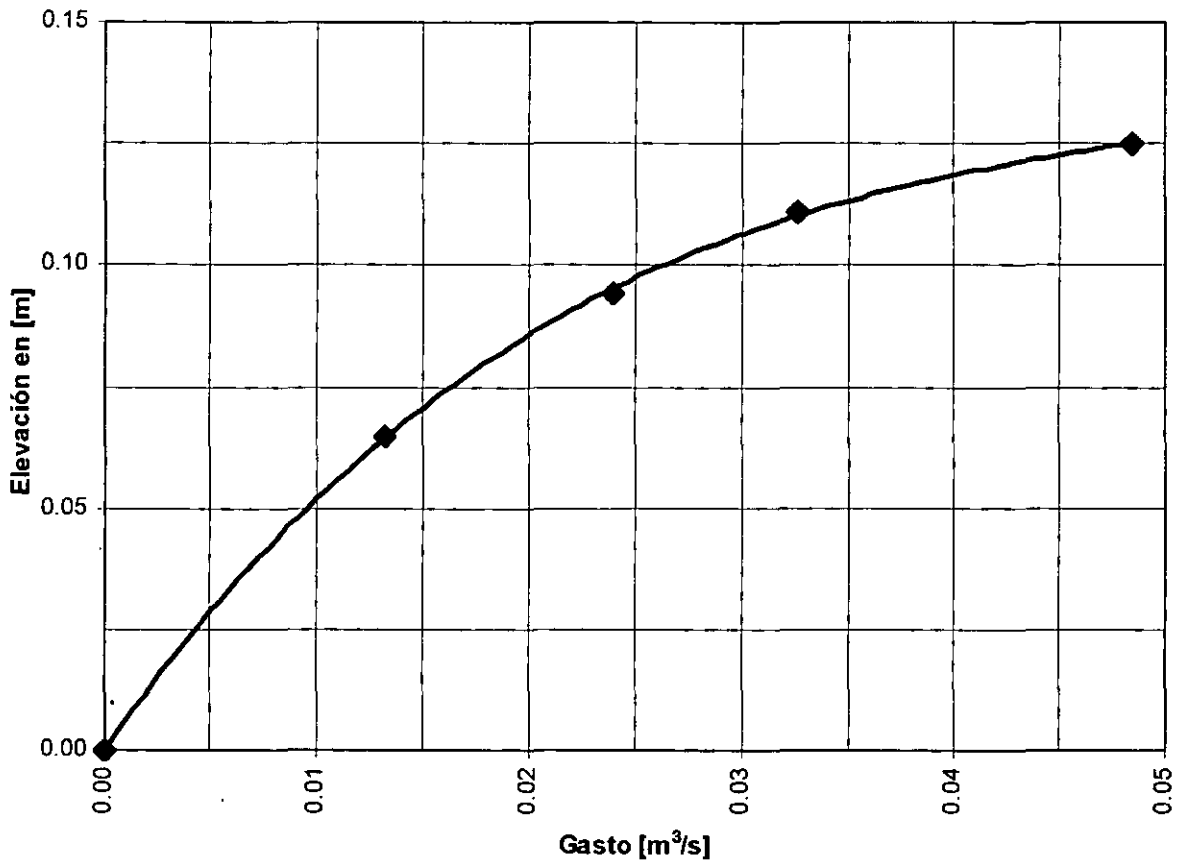


Figura 3.7. Curva de gastos del río empleando molinete.

### 3.4. MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO.

El medidor electromagnético, como ya se describió, es un aparato que sirve para medir la velocidad puntual en una corriente. El correcto uso de éste, requiere en principio de una adecuada calibración.

#### 3.4.1. Calibración.

Al igual que los molinetes, los medidores electromagnéticos de gasto son aparatos delicados y de gran sensibilidad, es necesario verificar periódicamente su precisión; ya que el uso y deterioro normales provocan cambios en su calibración.

Sin embargo, para este estudio no fue necesaria; ya que el medidor empleado es nuevo y contiene certificado de calibración. Sólo se realizaron pruebas en el canal empleado para obtener la constante de calibración (K) del micromolinete, para verificar que estaba en perfectas condiciones de uso. Los resultados fueron similares tanto en el vertedor como en el canal.

#### 3.4.2. Cálculo de la curva de gastos.

Como ya se mencionó, éste tipo de aforo pertenece al de tipo sección-velocidad; y es por ello, que al igual que en el caso de aforo con molinete, consta de dos operaciones: área de la sección y velocidad media. A continuación se presenta el registro de aforo con este medidor para cuatro elevaciones en el cauce, dicho registro es similar al que se realiza con molinete y también contiene todos los elementos necesarios para el cálculo de la curva de gastos. La obtención de áreas ya no fue necesaria, por tratarse de las mismas elevaciones en el cauce que en el caso del método anterior.

En este aforo no fue necesario el registro de 2 o más velocidades para un mismo punto; ya que como se explicó, el dispositivo proporciona la desviación estándar, lo cual es de muchísima ayuda, de esta forma se toma el valor de velocidad puntual para el valor mínimo de desviación; teniendo así la certeza de que se trata del valor más adecuado. En el Capítulo IV se analizarán a detalle los valores de desviación obtenidos y el significado de éstos.

Este aforo se realizó aplicando el método de los 6/10, el cual considera que a esta profundidad, la velocidad puntual del agua es muy semejante a la velocidad media en la vertical en que se está haciendo la observación. Debido a que si se hacían mediciones en puntos muy cercanos al fondo o a las paredes del cauce se incurriría en errores, esto debido a las características físicas del sensor con que cuenta el medidor.

Tabla 3.6. REGISTRO DE AFORO Y CÁLCULO DE GASTOS CON MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

Elevación 1									Observaciones
SONDEOS		MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO			VELOCIDAD				
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		Desviación estándar	En el punto	Media del tramo	Área	Gasto parcial	
m	m	Método	m		m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
0.0780	0.0920	0.6	0.0552	0.022	0.8570	0.8570	0.0120	0.01032	Se dividió la sección transversal del cauce en tres dovelas. En las tres dovelas se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad.
0.2340	0.1250	0.6	0.0750	0.015	0.9160	0.9160	0.0192	0.01760	
0.3900	0.0880	0.6	0.0528	0.022	0.8960	0.8960	0.0124	0.01113	
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>								<b>0.03904</b>	

Elevación 2									Observaciones
SONDEOS		MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO			VELOCIDAD				
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		Desviación estándar	En el punto	Media del tramo	Área	Gasto parcial	
m	m	Método	m		m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
0.0763	0.0800	0.6	0.0480	0.026	0.7680	0.7680	0.0099	0.00757	Se dividió la sección transversal del cauce en tres dovelas. En las tres dovelas se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad.
0.2288	0.1110	0.6	0.0666	0.021	0.8210	0.8210	0.0170	0.01398	
0.3813	0.0770	0.6	0.0462	0.023	0.8160	0.8160	0.0102	0.00835	
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>								<b>0.02991</b>	

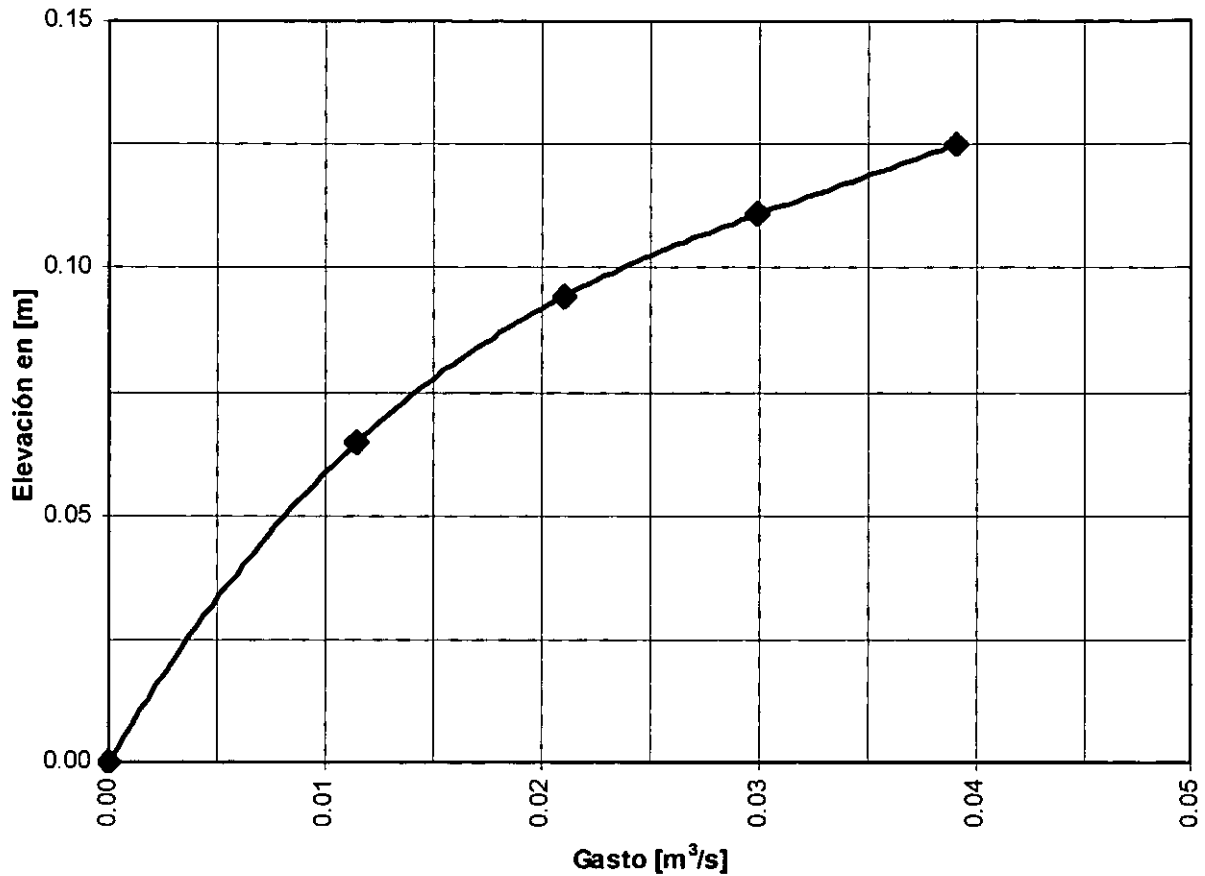
Tabla 3.6. REGISTRO DE AFORO Y CÁLCULO DE GASTOS CON MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

Elevación 3									Observaciones No se dividió la sección transversal en dovelas. Se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad.
SONDEOS		MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO			VELOCIDAD				
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		Desviación estándar	En el punto	Media del tramo	Área	Gasto parcial	
m	m	Método	m		m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
0.2048	0.0941	0.6	0.0565	0.027	0.7770	0.7770	0.0271	0.02106	
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>								<b>0.02106</b>	

Elevación 4									Observaciones No se dividió la sección transversal en dovelas. Se consideró como velocidad media la del punto a 0.6y de profundidad.
SONDEOS		MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO			VELOCIDAD				
Distancia del punto inicial	Profundidad	Profundidad de la observación		Desviación estándar	En el punto	Media del tramo	Área	Gasto parcial	
m	m	Método	m		m/s	m/s	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s	
0.1040	0.0650	0.6	0.0390	0.029	0.7180	0.7180	0.0160	0.01149	
<b>Gasto total [m<sup>3</sup>/s]</b>								<b>0.01149</b>	

A continuación se presenta la curva de gastos del cauce, obtenida con el aforo con medidor electromagnético (figura 3.8.). En este caso también se siguió la tendencia de la curva a partir de la elevación de 6.5 cm en el cauce.



**Figura 3.8. Curva de gastos del río empleando medidor electromagnético.**

Si bien, en este capítulo se obtuvo las curvas para cada método de aforo por separado, en el siguiente capítulo se superpondrán en un mismo plano y se hará el análisis comparativo entre los métodos.

---

**CAPÍTULO IV****ANÁLISIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES.**

Hasta el momento se ha trabajado cada método de aforo por separado. En este capítulo se realiza un análisis comparativo general de los resultados obtenidos. Dicho análisis contiene un enfoque estadístico y práctico. Finalmente con base en el análisis de las curvas de elevaciones-gastos, se determina la congruencia, precisión y confiabilidad de los métodos de aforo aplicados.

**4.1. ERRORES Y RECOMENDACIONES DE MEDICIÓN.**

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando, que es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia (en este caso agua) que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurado es vital para obtener buenos resultados de la medición, que para el presente trabajo fue la medición del gasto en un cauce natural.

La imperfección natural de la realización de mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud: Toda medición lleva implícita una incertidumbre, la cual es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurado.

El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurado y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. La incertidumbre se compone de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas. Algunas de éstas son inevitables por la definición del propio mensurado, mientras otras pueden depender del: principio de medición, método y procedimiento seleccionado para la medición.

Algunos atributos no cuantificables pueden influir en el resultado de la medición, y por lo tanto en la incertidumbre, en cuyo caso es siempre recomendable reducir en lo posible sus efectos, preferentemente haciendo uso de criterios de aceptación en las actividades tendientes a reducir tales efectos.

Pretender estudiar el proceso de medición de manera exacta y completa está usualmente fuera de las actividades del ingeniero, más aún es el propósito de la investigación científica, cuya solución pocas veces se vislumbra. Por lo tanto, fue necesaria la simplificación del fenómeno (conservando las características más relevantes para cumplir con los objetivos planteados), mediante la construcción de un modelo para realizar mediciones.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurado y las variables físicas o químicas relevantes para la medición.

En la siguiente tabla se sintetizan las hipótesis hechas para la aplicación de cada método de aforo. Algunas de ellas no generaron incertidumbre en el valor del mensurado por tratarse de un modelo de cauce natural, sin embargo en la práctica profesional se deben de tomar en cuenta para la correcta estimación del gasto y de su incertidumbre.

Suposición	Vertedor	Molinete	Medidor Electromagnético
<b>Relaciones fenomenológicas entre variables</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Q=Chv^{5/2}</math></li> <li>• <math>C = \frac{8}{15} \sqrt{2g \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \mu K</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Q=VA</math></li> <li>• <math>v= K\#\text{golpes/t}</math></li> <li>• <math>V=V_{0,6y}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Q=VA</math></li> <li>• <math>V=V_{0,6y}</math></li> </ul>
<b>Consideraciones sobre el fenómeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de llegada despreciable.</li> <li>• Distribución uniforme de velocidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin transporte de sedimentos</li> <li>• Sección transversal del cauce invariable</li> <li>• Área calculada igual a la real</li> <li>• Sección de medición perpendicular a la corriente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin transporte de sedimentos</li> <li>• Sección transversal del cauce invariable</li> <li>• Área calculada igual a la real</li> <li>• Sección de medición perpendicular a la corriente</li> </ul>
<b>Consideraciones sobre propiedades de la sustancia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo permanente</li> <li>• Incompresible</li> <li>• Flujo unidimensional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo permanente-espacialmente variado</li> <li>• Flujo turbulento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo permanente-espacialmente variado</li> <li>• Flujo turbulento</li> </ul>

**Tabla 4.1. Hipótesis consideradas para cada método de aforo.**

Con base en la tabla anterior resulta evidente, que una medición física, tiene asociado un modelo que sólo aproxima el proceso real, que para este caso fue la determinación del gasto que circula por una estructura simuladora de cauce natural.

Una vez determinado el mensurado, principio, método y procedimiento, resta identificar y cuantificar las fuentes de incertidumbre, que provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo: (Ref.18)

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.
- La repetibilidad de las lecturas.



- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurado.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

En la Ingeniería Civil, se construyen obras de grandes magnitudes, que requieren contar con datos lo más preciso posibles, para el diseño y operación adecuadas de las mismas.

En el presente trabajo, se ha verificado la confiabilidad del aforo empleando un medidor electromagnético, sin embargo, no se deben desechar ninguna de las fuentes de incertidumbre, por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución, comparada con las demás. Siempre es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar alguna entre las cuales pudiera descartarse alguna importante. No obstante, siempre estarán presentes efectos que la experiencia, conocimientos y actitud crítica del Ingeniero permitirán calificar como irrelevantes después de las debidas consideraciones.

Existen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: uno basado en el análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras que el otro comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre. En cada método de aforo, se tendrá que realizar el análisis de la incertidumbre, con base a las condiciones de cada medición.

La clasificación anterior, no implica que pueda existir diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada una de los dos tipos de evaluación, puesto que ambos están basados en distribuciones de probabilidad.

La única diferencia es que un método estima esta distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición, mientras en el otro caso, se supone una distribución con base en experiencia o información externa al ingeniero.

No existe una recomendación general para el número ideal de repeticiones, ya que éste dependerá de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Se debe considerar que:(Ref.18)

- Aumentar el número de repeticiones reduce la incertidumbre, lo cual se podría llevar a cabo si el régimen es permanente.
- Un número grande de repeticiones aumentaría considerablemente el tiempo de medición, que en el caso de una avenida resultaría

contraproducente, ya que las condiciones no se mantienen constantes en el tiempo.

- En pocos casos se recomienda o se requiere que el número de mediciones para un mismo gasto, sea mayor a 10. Sólo cuando se caracterizan instrumentos o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud.

En general debe de procurarse un acomodo entre las conflictivas exigencias de precisión y tiempo, y un buen aforo habrá de tener en cuenta este arreglo en la planeación preliminar.

Otras fuentes de incertidumbre que deben ser evaluadas son la reproducibilidad y las obtenidas al hacer una regresión. En el caso del aforo en cauces naturales, resulta evidente que no se tendrá una alta reproducibilidad, ya que resulta imposible mantener constantes todas las características hidráulicas en éstos; sin embargo las medidas de tendencia central y la desviación estándar del conjunto de mediciones, nos debe conducir a un error, que se encuentre dentro de la precisión que se requiere.

### **Estadística de las mediciones.**

Para obtener el resultado que caracteriza mejor al grupo de mediciones, existen diversos criterios, y se debe de escoger uno de ellos, con base en el uso futuro que se dará a la información obtenida. Las diferentes posibilidades son las medidas de tendencia central: (Ref.8)

#### **a) La moda:**

La mayoría de las distribuciones tienen un punto máximo o pico cerca del centro. Si ese pico está bien definido, el valor sobre la escala horizontal en que ocurre se llama moda de la distribución. En las ocasiones en que se requiera diseñar con base en esta concentración, se hará con el valor modal. En ocasiones se tendrán dos puntos máximos; en ese caso se trata de una distribución bimodal.

#### **b) La mediana:**

Si se colocan todos los resultados en orden numérico y se dividen a la mitad en dos partes iguales, el valor correspondiente a esa línea divisoria se llama mediana. La mediana es el valor en el cual una línea vertical divide a la distribución en dos partes de área equivalentes. La mediana suele emplearse a menudo en la investigación sociológica, sin embargo en la ingeniería no es muy empleada.

#### **c) La media:**

La media no es mas que el promedio o media aritmética y es la más útil de las medidas de tendencia central. Para un grupo N de mediciones,  $x_i$ , la media se

define como:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad 4.a$$

Es importante considerar otra cuestión: ¿En qué medida el valor elegido representa a la distribución en su conjunto? Esto es, cuán segura resulta usar un solo valor como sustituto de toda la distribución?. Resulta un hecho de que, cuanto más amplia sea la distribución, menor será la importancia que se pueda asignar a cualquiera de los tres valores centrales. Por otra parte cuanto más estrecha sea la distribución, tanto más precisión se tendrá en el método de aforo empleado.

Una cantidad que representa una medida de la amplitud de la distribución, es la desviación estándar de la distribución, y se define como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{N - 1}} \quad 4.b$$

A continuación se presentan los valores de la desviación estándar, tanto para el medidor electromagnético como para el micromolinete, a fin de tener una idea más clara de la precisión de cada instrumento.

En el caso del medidor electromagnético, el valor de la desviación estándar es proporcionada para cada medición que se realiza, por lo que se considera de gran ventaja, ya que al realizar el aforo, se sabe de antemano, que incertidumbre tiene el dato que se está registrando. Dicha característica del medidor, se traduce en una reducción considerable del tiempo de aforo y un aumento en la precisión de los resultados obtenidos.

S	x(velocidad)	x-S	x+S	%E <sub>relativo</sub>
0.029	0.718	0.689	0.747	4.04
0.027	0.777	0.750	0.804	3.48
0.026	0.768	0.742	0.794	3.39
0.023	0.816	0.793	0.839	2.82
0.022	0.857	0.835	0.879	2.57
0.022	0.896	0.874	0.918	2.46
0.021	0.821	0.800	0.842	2.56
0.015	0.916	0.901	0.931	1.64

**Tabla 4.2. Precisión del medidor electromagnético.**

Se puede observar en la tabla 4.2. que al aumentar el gasto aforado, la desviación estándar disminuye, debido a que aumenta el área hidráulica y se cumple con la distancia mínima requerida entre el sensor y el fondo del cauce. Se puede decir entonces, que el medidor es altamente preciso, ya que la máxima incertidumbre que se obtuvo fue del 4.04%. Sin embargo, como se explicó, existen diversas fuentes de incertidumbre y otra fuente que interviene directamente, resulta del error que se tiene en el área hidráulica, es decir, la incertidumbre que se tiene en la medición de la batimetría de la sección de aforo.

En cuanto al micromolinete, existen tres fuentes de incertidumbre principales: la obtenida de la calibración de éste (K), la que se genera de la medición de la velocidad y al igual que en el caso del medidor electromagnético, la que genera el área de la sección hidráulica. En el Capítulo III se consideró la constante K de calibración como la media de la muestra (medida de tendencia central), sin embargo, hay que tener presente que ésta siempre tiene asociada una desviación estándar, la cual nos proporciona una parte de la incertidumbre que se tiene.

<b>Muestra</b>	
<b>x(K)</b>	
3.47	
3.48	<b>media= 3.51</b>
3.59	<b>S= 0.08</b>
3.62	<b>%E<sub>relativo</sub>= 2.27</b>
3.42	
3.47	

**Tabla 4.3. Incertidumbre de la calibración del micromolinete.**

Resulta entonces, que la incertidumbre obtenida aforando con el micromolinete, será siempre mayor al 2.27%, obtenida tan solo de la calibración. A pesar de ello, se puede considerar que para el fenómeno de estudio, se trata de una incertidumbre pequeña.

#### **4.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CURVAS ELEVACIONES-GASTOS.**

En el capítulo anterior se obtuvieron las curvas de elevaciones-gastos para cada uno de los tres métodos de aforo. Dichas curvas se determinaron con base en el principio estadístico de los mínimos cuadrados, el cual permitió identificar la mejor curva, para el conjunto de las mediciones realizadas con cada método. Para el ajuste, no fue necesaria la discriminación de ningún punto en ninguna de las tres curvas.

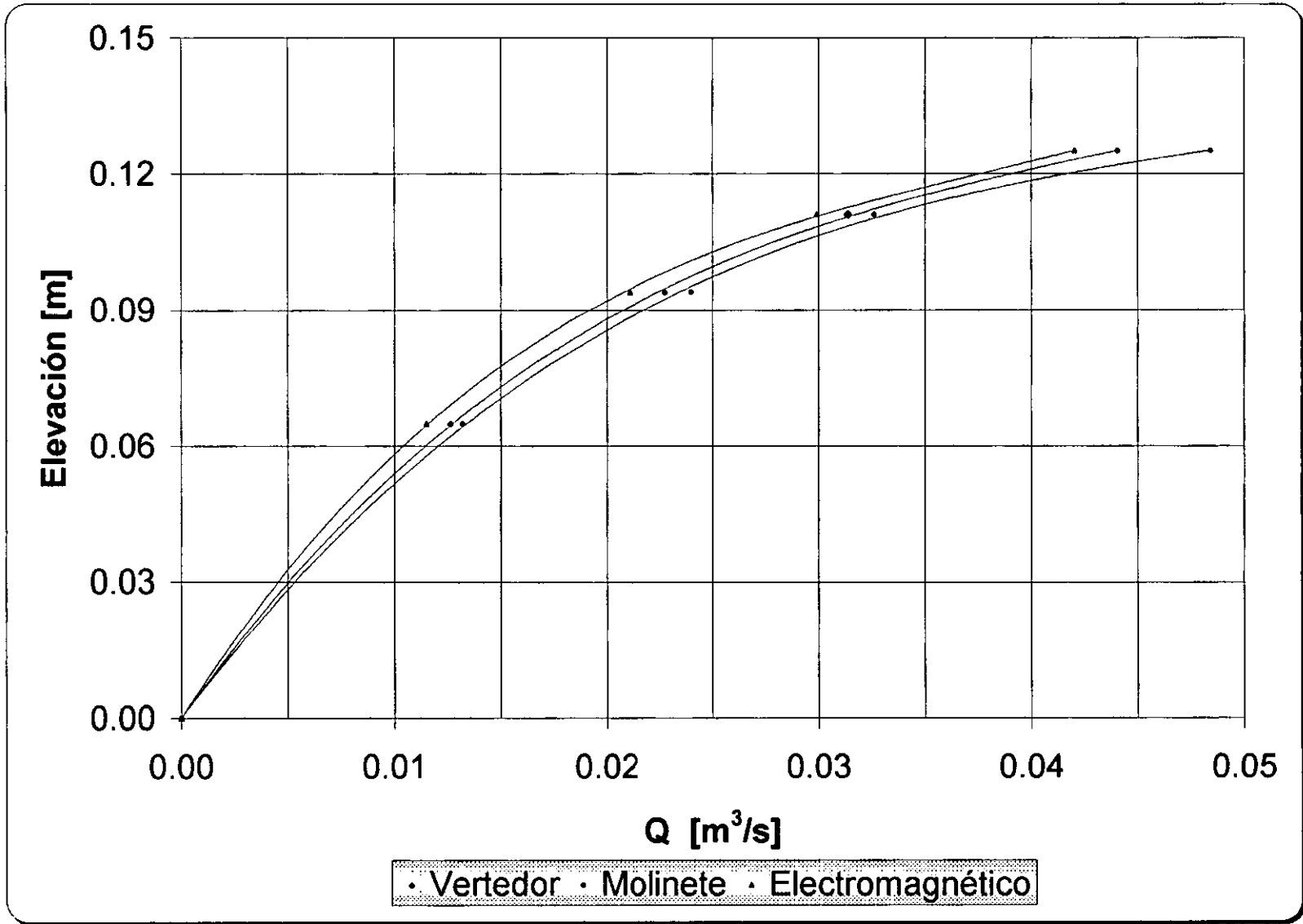


Figura 4.1. Curvas de elevaciones-gastos del cauce.

El método de los mínimos cuadrados permitió hacer la elección de la mejor curva con base en las desviaciones de los puntos en dirección vertical. Resultó entonces la mejor curva para cada método de aforo, aquella que minimizó la suma de los cuadrados de las desviaciones. El procedimiento de minimizar los cuadrados de las desviaciones da lugar, a una menor varianza de los parámetros resultantes que al usar cualquier otro criterio. De ahí que el uso de dicho principio esté tan difundido.

Cabe mencionar, que para la aplicación del principio, se consideró que todos los valores son igualmente precisos, es decir, no se realizó una preponderación en los cálculos.

A continuación se presenta una gráfica de las tres curvas superpuestas (figura 4.1.), las cuales han sido ajustadas con el mismo principio a un polinomio de tercer grado. Dicho ajuste permite realizar un análisis cualitativo entre éstas.

Antes que nada, se puede ver que los resultados obtenidos experimentalmente quedan muy cercanos a las curvas que arrojó el modelo de los mínimos cuadrados, es decir, la varianza que se tiene es mínima.

A continuación se presentan el error de regresión, para cada una de las curvas que arrojó el principio empleado en el ajuste. En el caso del vertedor se presentó la menor dispersión de los resultados con respecto a la curva de tendencia, en cambio para el método de molinete se tiene la mayor dispersión. Sin embargo, se puede considerar que en los tres casos (vertedor, molinete y medidor electromagnético) se obtuvo un error típico de regresión muy bajo.

Elevación	Vertedor	Micromolinete	Electromagnético
E [m]	$Q_{VT}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{Micro}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{Elec}$ [m <sup>3</sup> /s]
0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0.065	0.0126	0.0132	0.0115
0.094	0.0228	0.0240	0.0211
0.111	0.0314	0.0326	0.0299
0.125	0.0441	0.0484	0.0420
<b>Error</b>	<b>0.01734</b>	<b>0.01904</b>	<b>0.01824</b>

**Tabla 4.4. Error de regresión.**

Se observa que las tres curvas siguen un comportamiento similar, es decir, se presenta una compatibilidad entre ellas en todo el intervalo de gastos aforados. Durante todo el intervalo, el micromolinete arrojó los gastos menores; los resultados obtenidos con el vertedor triangular fueron los intermedios, mientras que los gastos aforados con el medidor electromagnético, fueron los mayores para todo el rango.

Se ve con claridad que las curvas empleando vertedor y medidor electromagnético, presentan más compatibilidad mientras mayor sea el gasto aforado. Esto se debe, al error en que se incurre cuando las paredes o el fondo del cauce, se encuentran muy cercanas al sensor del medidor. Sin embargo, no es una limitante en la práctica profesional, ya que un cauce por más pequeño que sea, no presentará esa dificultad para el aforo. Hay que recordar, que esta limitante se presentó, debido a las dimensiones de la estructura que se empleó para realizar los aforos.

Ahora bien, de la curva de gastos obtenida aforando con micromolinete, se concluye que mientras más aumenta el gasto, se va presentando mayor diferencia entre el gasto obtenido con vertedor y micromolinete. Esta diferencia se puede deber al régimen que se presentó para las mayores elevaciones, esto aunado a la desviación estándar que se tiene en la calibración del micromolinete.

Para tener una idea más clara de las diferencias obtenidas entre cada uno de los métodos, se calcula el porcentaje de error para cada gasto aforado. En el cálculo se considera como valor teórico los gastos del vertedor triangular, ya que fueron en todos los casos el valor intermedio. Además de que, en la literatura se considera a este método de aforo como el más exacto y confiable.

Elevación	Vertedor	Micromolinete	%Error
E [m]	$Q_{VT}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{Micro}$ [m <sup>3</sup> /s]	
0.000	0.0000	0.0000	
0.065	0.0126	0.0132	<b>4.66</b>
0.094	0.0228	0.0240	<b>5.44</b>
0.111	0.0314	0.0326	<b>4.01</b>
0.125	0.0441	0.0484	<b>9.90</b>

**Tabla 4.5. Porcentaje de error entre vertedor y micromolinete.**

Efectivamente, se verifica que a mayores elevaciones, existe una diferencia mayor entre ambos métodos, esto debido a las diversas fuentes de incertidumbre que se tienen.

Elevación	Vertedor	Electromagnético	%Error
E [m]	$Q_{VT}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{Elec}$ [m <sup>3</sup> /s]	
0.000	0.0000	0.0000	
0.065	0.0126	0.0115	<b>8.90</b>
0.094	0.0228	0.0211	<b>7.48</b>
0.111	0.0314	0.0299	<b>4.66</b>
0.125	0.0441	0.0420	<b>4.58</b>

**Tabla 4.6. Porcentaje de error entre vertedor y medidor electromagnético.**

Se observa, que conforme aumenta el gasto y por ende el área de la sección de aforo, el error obtenido aforando con medidor electromagnético disminuye, debido a que ya no se presenta la desventaja de las paredes y fondo del cauce muy cercanas al sensor, es decir, se cumple con la condición del volumen de agua monitoreado, lo cual, aunado al análisis estadístico realizado anteriormente, confirma la alta precisión y exactitud del medidor de flujo electromagnético.



---

## CONCLUSIONES

Considero que cumplí, con los objetivos planteados al iniciar este trabajo. En primer lugar, logré hacer un compendio general de las diversas alternativas que existen para aforar una corriente natural. Aunado a ello, a través de un proceso de experimentación, comprobé que uno de los métodos de aforo que llamé alternativo: "Medidor de Flujo Electromagnético", es altamente eficiente y preciso, si se aplica correctamente.

Aclaro que cualquier método, nos arrojará resultados que son sólo estimaciones o aproximaciones. Sin embargo, el conocer detalladamente su principio y el procedimiento de medición; son factores que determinan la magnitud de la incertidumbre en el resultado final.

Resulta entonces inevitable, que al aforar un cauce natural, se incurra en un error; sin embargo, considera que lo que sí está al alcance del ingeniero es planear el proceso de medición; lo cual implica un estudio y conocimiento profundo de:

- La magnitud de la corriente que se requiera aforar
- Tiempo disponible
- Precisión requerida o deseada
- Recursos disponibles
- Los posibles métodos de aforo
- Selección de la estructura o instrumento de medición adecuado, de acuerdo al método seleccionado
- Condiciones para la correcta aplicación del método

A continuación presento una tabla, en la que sintetizo las características, ventajas, desventajas y aplicabilidad de los tres métodos que apliqué en este estudio. Ésta, se basa en las observaciones realizadas durante el desarrollo del proceso de medición, los resultados obtenidos y el análisis cualitativo y estadístico de éstos. La finalidad de la tabla es servir como una guía, en la etapa de planeación y selección del proceso de medición. Sin embargo, no pretendo que sea un recetario; ya que siempre son necesarios el criterio y experiencia del ingeniero, para una adecuada selección.

	<b>Vertedor Triangular de Pared Delgada</b>	<b>Molinete</b>	<b>Medidor de Flujo Electromagnético</b>
<b>Costo de la estructura o instrumento</b>	Alto costo de ejecución	Bajo costo del equipo	Alto costo del equipo
<b>Mantenimiento</b>	Constante mantenimiento y variación del coeficiente de descarga	Requiere constantemente de mantenimiento y calibración	Sólo requiere de mantenimiento y calibración una vez por año.
<b>Precisión</b>	Muy alta precisión (98%) Mínima dispersión de los resultados en la curva E-Q	Alta precisión (95%) Mediana dispersión de los resultados en la curva E-Q	Muy alta precisión (98%) Poca dispersión de los resultados en la curva E-Q
<b>Calidad del agua</b>	Agua limpia, salina y residual. Aplicable en corrientes con poco arrastre de material sólido, ya que se presentan problemas de mantenimiento y variaciones en el coeficiente de descarga	Aplicable en agua limpia, salina y residual. Sensible a objetos que pudiese arrastrar la corriente como hojas, basura, etc., ya que se afecta el libre giro de las aspas.	Aplicable en agua limpia, salina y residual. No presenta sensibilidad al material sólido de la corriente.
<b>Tamaño de la corriente</b>	Recomendable en corrientes pequeñas con gasto de $0.5\text{m}^3/\text{s}$ y sección pequeña	No recomendable para corrientes someras Altamente recomendable en corrientes grandes	Recomendable en corrientes con elevación mayor a 10 cm
<b>Rango de velocidades</b>	Velocidades altas requieren corrección del coeficiente de descarga	Baja precisión en velocidades menores a 0.15 m/s	Alta precisión en todo el rango de velocidades
<b>Eficiencia</b>	Altera el régimen de la corriente Corto tiempo de aforo	No altera el régimen de la corriente Largo tiempo de aforo Fácilmente transportable	No altera el régimen de la corriente Mediano tiempo de aforo Fácilmente transportable
<b>Repetibilidad</b>	Alta	Mediana	Alta gracias a que proporciona la desviación estándar para cada medición
<b>Selección del tramo de aforo</b>	Requiere de una sección de aforo muy específica	Requiere de una sección de aforo muy específica	No requiere de una sección de aforo muy específica

El medidor de flujo electromagnético, fue el centro del presente trabajo, y como mencioné, pertenece a los del tipo "Sección-Velocidad"; por consiguiente resulta importante la batimetría de la sección de aforo. Ya que la mayor incertidumbre reside precisamente en la obtención del área, más que la velocidad. Esto se comprueba si se comparan la incertidumbre total obtenida en el valor de los gastos con la referente sólo al medidor electromagnético: la primera en promedio del 6%, en tanto que la segunda tan sólo es del 2.7% en promedio. Una forma de reducir el error total, es disminuir la incertidumbre en la medición de la batimetría y cálculo del área de la sección transversal del cauce.

Una vez más interviene el juicio del ingeniero, con base en la importancia y uso de los resultados, se debe limitar el rango de la incertidumbre; para obtener la precisión requerida en las variables de entrada que intervienen en el resultado.

En la actualidad existen muy diversos y variados instrumentos y estructuras para aforar un cauce. Sin embargo, en México, los organismos encargados de optimizar la administración de los recursos hidráulicos como son: La Comisión Nacional del Agua (CNA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), La Comisión Federal de Electricidad, entre otros, se han mantenido inmóviles ante estas nuevas alternativas.

Si bien, las herramientas actuales, para el análisis y manipulación de datos, son múltiples y avanzadas; resultan de poco beneficio para la Ingeniería Civil, si no se cuenta con datos verídicos y precisos.

No pretendo generalizar y decir, que un método es el mejor, definitivamente no ocurre así; en cada caso el ingeniero se enfrentará a diferentes condiciones específicas; en el cual tendrá que hacer uso de su imaginación, inteligencia, prudencia y sentido de la observación.

Para finalizar, quisiera concluir haciendo una invitación a todo aquel que de cierta forma esté involucrado en esa labor tan importante como lo es "Medir el agua"; para que se abra a estas nuevas alternativas, que gracias al avance tecnológico, nos ofrecen la posibilidad de una mejor administración de este recurso de valor infinito como lo es "El Agua".

El tema de aforo es basto, y en correspondencia, la literatura sobre él es muy extensa y diversa. En lo concerniente al aforo con medidor electromagnético, las referencias son en su mayoría, de manuales o folletos, de los diversos proveedores o fabricantes de éste; es por ello que se encuentran diversas direcciones de páginas electrónicas como referencia. La siguiente lista dista mucho de ser exhaustiva. Sólo pretendo proporcionar unas sugerencias que puedan servir como punto de partida para el estudio individual.

- [1] Aparicio M., Francisco. *"Fundamentos de Hidrología de Superficie"*. Limusa. México, 1987.
- [2] Campos A., D.F. *"Procesos del Ciclo Hidrológico"*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México, 1998.
- [3] CNA. *"Instructivo para Aforo de Corrientes"*. 1997.
- [4] C. F., Cisick. *"Flow Meter Engineering Handbook"*. Honeywell. 1995
- [5] Chow, V.T. *"Open-Channel Hydraulics"* Mc Graw Hill. Singapure, 1986.
- [6] Claudio Mataix. *"Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas"*. Harper & Row. 1970.
- [7] Dake, J.M. *"Essentials of Engineering Hydraulics"*. Macmillan. Press/London, U.K, 1983.
- [8] D.C., Baird. *"Experimentación"*. Prentice Hall. México, 1991.
- [9] Enciclopedia, Microsoft. *"Encarta"*. 1999.
- [10] Klohn, W. *"Aforos por Dilución de Trazadores"*. Ministerio de Agricultura. Colombia, 1971.
- [11] Klohn, W. y Levy, A. *"Manual de Aparatos e Instrumentos Hidrométricos"*. Ministerio de Agricultura. Colombia, 1972.

- [12] Plata, A. *"Isótopos en Hidrología"*.  
Alhambra. Madrid, España, 1972.
- [13] Roberson, C. *"Hydraulics Engineering"*.  
Houghton Mifflin Company. USA, 1988.
- [14] Rosas, Lucía. *"Iniciación al Método Científico Experimental"*.  
Trillas. México, 1991.
- [15] Sotelo Á., Gilberto. *"Hidráulica General"* (Volumen 1).  
Noriega-Limusa. México, 1990.
- [16] Sotelo Á., Gilberto. *"Hidráulica General"* (volumen 2).  
Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1991.
- [17] Ziebolz, H. *"Solutions for Flow Measurement"*.  
Rev. Sci. Instr., vol. 15 .
- [18] W. Schmid y R. Lazos. *"Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición"*.  
CENAM. México, 2000.

<http://hispagua.cedex.es/Grupo1/Revistas/Ingcivil/113/articulo5/modelizacion.html>

<http://mgdinc.com/products.html>

<http://www.cchen.cl>

<http://www.coimsa.com.mx>

<http://www.cenam.mx>

<http://www.cna.gob.mx>

<http://www.eleint.co.uk>

<http://www.imta.gob.mx>

<http://www.krasa.com.mx>

<http://www.labmetas.com.mxg>

<http://www.megalink.com/ihh/ihh.html>

<http://www.oiml.org>

<http://www.valeport.co.uk>