

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**Aforo del canal principal del Distrito de Riego 005 Delicias,
Chihuahua utilizando medidores ultrasónicos de efecto doppler**

POR:

NEREIDA GALINDO SINECIO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México.

Diciembre de 2009

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**Aforo del canal principal del Distrito de Riego 005 Delicias,
Chihuahua utilizando medidores ultrasónicos de efecto doppler**

POR:

NEREIDA GALINDO SINECIO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Torreón, Coahuila, México.

Diciembre de 2009

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS

**"Aforo del canal principal del Distrito de Riego 005 Delicias,
Chihuahua utilizando medidores ultrasónicos de efecto doppler"**

**Elaborada bajo la supervisión del comité de asesoría y aprobada
como requisito parcial para optar el grado de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

COMITÉ ASESOR:

ASESOR PRINCIPAL:



Ph.D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

ASESOR:



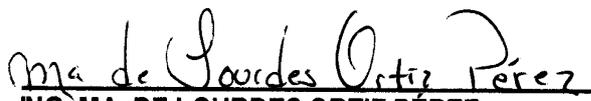
M.C. JOSÉ GUADALUPE GONZÁLEZ QUIRINO

ASESOR:



M.C. FEDERICO VEGA SOTELO

ASESOR:



ING. MA. DE LOURDES ORTIZ PÉREZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO



**Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas**

Torreón, Coahuila

Diciembre del 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

**"Aforo del canal principal del Distrito de Riego 005 Delicias,
Chihuahua utilizando medidores ultrasónicos de efecto doppler"**

TESIS PRESENTADA POR:

NEREIDA GALINDO SINECIO

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

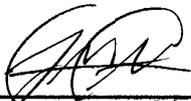
COMITÉ EVALUADOR:

PRESIDENTE:



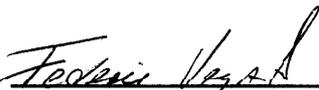
Ph.D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

VOCAL:



M.C. JOSÉ GUADALUPE GONZÁLEZ QUIRINO

VOCAL:



M.C. FEDERICO VEGA SOTELO

VOCAL SUPLENTE:



M.C. J. ISABEL MÁRQUEZ MENDOZA

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO



**Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas**

Torreón, Coahuila

Diciembre de 2009

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida, oportunidades y el don de la libre elección que nos brinda cada día, con la que nosotros mismos forjamos nuestro futuro.

A mis padres, que siempre han estado a mi lado apoyándome en toda circunstancia, a pesar de que las condiciones no sean las mejores. Agradecida estoy porque han puesto su confianza en mí para realizar esta carrera profesional.

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” porque tuvo una puerta abierta para recibirme, muchas manos para formarme como profesional, y todos los servicios con los que conté durante mi estancia aquí.

A cada uno de mis maestros, por transmitir sus conocimientos y sus experiencias en el aula, por impulsar y guiar mi carrera.

A mis asesores que me ayudaron aportando su conocimiento para hacer posible este trabajo.

Al Distrito de Riego 005 que fue de gran importancia en mi formación académica, y por las facilidades brindadas para llevar a cabo esta tesis.

A la familia Preciado Villalobos por abrirme las puertas de su casa y de su corazón cuando estuve fuera haciendo las prácticas profesionales.

DEDICATORIAS

A mis padres Juan Manuel Galindo Bejar y Martha Sinecio Porras porque sin ellos no hubiera podido lograrlo. Nos costó mucho esfuerzo y perseverancia y ahora compartimos el orgullo de que a pesar de la distancia siempre los tuve caminando a mi lado superando obstáculos para llegar a ser quienes somos ahora.

A mi hermano Juan que junto con mis papás estuvo siempre al pendiente y apoyándome en todo lo que se pudo, a quien admiro por su entrega a su profesión y por su fortaleza como persona.

A mi hermana Sandra y a Víctor mi cuñado quienes me han dado apoyo incondicional y consejos para seguir adelante quienes me han dado el ejemplo de no dejar de luchar por lo que se anhela.

A mi sobrina Frida, quien ha sido un rayo de luz en mi familia cuando pasamos tiempos difíciles. A mi sobrino Víctor Isaac regalo de Dios recién entregado quien ha sido esperado con mucho amor.

A mi novio Alfredo, quien me ha brindado apoyo en los momentos que más lo necesité, quien ha compartido conmigo la etapa mas linda de mi vida y juntos hemos convertido las lágrimas en esperanza.

A mis amigos Liz, Rosy, Nilda, Lucía, Alex y Edgar "Brody", con quienes compartí los mejores momentos, y me demostraron su cariño y comprensión, a quienes considero como de mi familia.

RESUMEN

La región agrícola del Valle de Delicias cuenta con una superficie de 71,197 has las cuales son irrigadas con agua proveniente de las presas “La Boquilla” y “Fco. I. Madero”. El agua es un factor importante en la producción de cualquier cultivo en la región. La entrega volumétrica tiene importancia en la tecnificación de los distritos de riego en México ya que mediante ésta se puede incrementar la eficiencia en uso de agua al crear conciencia entre los usuarios de su ahorro. El objetivo de este trabajo fue evaluar la confiabilidad de los instrumentos automáticos de medición de volumen de agua. El presente se realizó durante el ciclo agrícola 2007-2008 en el Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua, México. El punto de medición para realizar la evaluación fue en el kilómetro 106 del Canal Principal San Pedro. Los instrumentos de medición que se utilizaron para establecer la base de datos fueron: Molinete, compuertas radiales y aforador ultrasónico de efecto doppler. Las observaciones se realizaron diariamente durante el ciclo 2007-2008 que comprende de marzo a agosto, tomando como referencia el ciclo anterior y parte del posterior. Los resultados indicaron que no existe diferencia significativa entre los diferentes instrumentos de medición de volumen de agua utilizados en esta evaluación, ya que se obtuvieron porcentajes de variación de $\pm 5\%$.

Palabras clave: distrito de riego, entrega volumétrica, molinete, aforador ultrasónico de efecto doppler.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	II
RESUMEN	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE CUADROS	VII
INDICE DE APÉNDICE	VII
I. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Hipótesis	3
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. Algunas propiedades del agua.....	4
2.1.1. Viscosidad	4
2.1.2. Densidad.....	5
2.1.3. Peso específico	5
2.1.4. Presión.....	6
2.2. Importancia de la hidrometría.....	6
2.3. Canales	7
2.4. Estructuras de medición.....	8
2.4.1. Compuertas radiales.....	8
2.5. Método de aforo	9
2.5.1. Método de Área-Velocidad	9
2.5.1.1. Flotador.....	10
2.5.1.2. Molinete	11
2.5.1.2.1 Área de la sección transversal	11
2.5.1.2.2. Velocidad en la sección transversal	12
2.5.1.3. Acústicos	15
2.6. Bases físicas del ultrasonido.....	18

2.6.1. Definición de ultrasonido	18
2.6.2. Propiedades de la onda ultrasónica.....	19
2.6.2.1. Velocidad	19
2.6.2.2. Frecuencia	20
2.6.2.3. Longitud de onda	20
2.6.2.4. Amplitud.....	21
2.6.2.5. Período	21
2.6.2.6. Intensidad	22
2.7. Principios físicos del efecto Doppler	22
2.7.1. El emisor está en reposo ($v_E = 0$)	22
2.7.2. Cuando el emisor está en movimiento ($v_E < v_s$).....	23
2.7.3. Cuando el emisor está en movimiento ($v_E = v_s$).....	24
2.7.4. Cuando el emisor está en movimiento ($v_E > v_s$).....	25
2.8. Instrumentación de la medida del caudal.....	26
2.8.1. Requerimientos generales.....	26
2.8.2. Tipos de dispositivos de medición	27
2.8.3. Consideraciones en la selección de los dispositivos de medición	27
2.9. Medidor ultrasónico de efecto doppler	27
2.9.1. Componentes	28
2.9.1.1. Cubierta.....	28
2.9.1.2. Transductor Horizontal	28
2.9.1.3. Transductor Vertical.....	28
2.9.1.4. Sensor de presión.....	28
2.9.1.5. Sensor de temperatura	28
2.9.2. Medición del área hidráulica	29
2.9.3. Medición de la velocidad media.....	31
III. MATERIALES Y METODOS.....	32
3.1. Localización del sitio experimental.....	32
3.2. Características físicas del Distrito de Riego 005 Delicias	33
3.3. Localización del punto de medición	33
3.4. Toma de datos	34

3.4.1. Aforo con molinete	35
3.4.2. Compuertas radiales	35
3.4.3. Aforo con medidor ultrasónico de efecto doppler	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
V. CONCLUSIONES	40
VII. LITERATURA CITADA.....	41
VIII. APÉNDICE	43

INDICE DE FIGURAS

Número	Contenido	Página
1	Flujo en una compuerta radial.....	8
2	Medición de un tramo de canal.....	10
3	Dovelas verticales para una sección trapezoidal.....	12
4	Molinete electromecánico de copas tipo “Pigmeo o enano”.....	13
5	Molinete electromecánico de copas tipo “Price”.....	16
6	Colocación de los transductores.....	15
7	Aforador de tiempo y tránsito (ATT).....	16
8	Aforador ultrasónico de efecto doppler horizontal.....	17
9	Aforador ultrasónico de efecto doppler vertical “Barquito”.....	17
10	Ultrasonido.....	18
11	Esquema de la transmisión de la onda.....	20
12	Período (T) de una onda ultrasónica.....	21
13	Ondas de emisor en reposo.....	23
14	Ondas de emisor en movimiento.....	24
15	Ondas de emisor a la velocidad de propagación.....	25
16	Ondas de emisor en movimiento.....	26
17	Componentes del medidor ultrasónico de efecto doppler.....	29
18	Secciones geométricas del canal.....	30
19	Localización del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua.....	32

20	Distribución de los diferentes equipos de medición.....	33
21	Localización de los puntos de medición.....	34
22	Ventana Principal del BBTalk.....	36
23	Ventana de observación del WinH-ADCP.....	36
24	Extracción de datos por medio de un ordenador portátil.....	37
25	Ventana de diálogo Star del WinH-ADCP.....	37
26	Volumen mensual total de las compuertas radiales, molinete y el medido de efecto C.N.A.- U.A.A.A.N. - U.L. 2008.....	39
27	Volumen mensual promedio de las compuertas radiales, molinete y el medidor de efecto doppler. C.N.A. - U.A.A.A.N. - U.L. 2008.....	44

INDICE DE CUADROS

Número	Contenido	Página
1	Diferencia de volúmenes aforados respecto al AD (%)......	39

INDICE DE APÉNDICE

Número	Contenido	Página
A1	Volumen total mensual (Mm ³) usando las compuertas radiales, el molinete y el medidor de efecto doppler. C.N.A. U.A.A.A.N. – U.L.....	45
A2	Volumen promedio diario (Mm ³) usando las compuertas radiales, el molinete y el medidor de efecto doppler. C.N.A. U.A.A.A.N. – U.L.....	45

I. INTRODUCCIÓN

En México aproximadamente 6.5 millones de hectáreas cuentan con infraestructura de riego, de las cuales el 53 % corresponde a 86 distritos de riego. Los distritos de riego son fundamentales para la producción de alimentos y para la obtención de divisas, debido a que su productividad es 3.7 veces mayor que en las áreas de temporal, (Programa Nacional Hidráulico 2007 – 2012).

De acuerdo a las demandas sociales para hacer un uso eficiente del agua de riego, se han tomado algunas medidas en los distritos de riego, una de las más importantes es el mejoramiento de la infraestructura hidroagrícola, promoviendo el revestimiento de canales, construyendo infraestructura complementaria, rehabilitando obras, tecnificando el uso y manejo del agua desde nivel parcelario hasta la operación de redes de canales principales.

La entrega volumétrica tiene importancia en la tecnificación de los distritos de riego en México ya que mediante ésta se puede incrementar la eficiencia en uso del agua al crear conciencia entre los usuarios.

Para implementar la entrega volumétrica es indispensable disponer de la infraestructura de medición del agua en toda la red de distribución, esto permitirá mejorar la distribución, al conocer con buen nivel de confiabilidad el gasto que se maneja en cada punto de control.

Existen diversos métodos de medición del gasto en canales, la elección del más adecuado depende de los factores: Precisión requerida, permanencia de la estructura medidora, frecuencia de las mediciones, tirante de agua, pérdidas de carga provocadas por la propia estructura, economía, sencillez de operación, disponibilidad y portabilidad.

Los métodos y estructuras de aforo requieren de ciertas condiciones de operación para que la medición sea confiable, por lo que se debe seleccionar la opción que mejor se adapte a cada caso. Los métodos y técnicas de aforo en canales comúnmente empleados en los distritos de riego son los siguientes: Área-velocidad (molinete, flotadores, ultrasónicos), aforador de garganta larga, aforador Parshall, vertedor, módulos de gasto constante, medidor de doble compuerta, y compuertas calibradas.

El perfilador de efecto doppler se ha elegido para hacer mediciones de gastos ya que es calibrado con el método volumétrico y presenta su descripción, características y funcionamiento con el objetivo de evaluar su comportamiento, eficiencia y confiabilidad comparando sus resultados con los del molinete.

El buen uso de los medidores de caudal, mejora la programación de riego, incrementa la eficiencia de distribución y ayuda a realizar una base de datos de caudal en canales de riego.

1.1. Objetivo

Comparar los valores de volumen de agua observados con diferentes técnicas de aforo durante el período 2006-2009.

1.2. Hipótesis

Los métodos de medición del volumen de agua en canales abiertos son confiables y precisos utilizando diferentes instrumentos de medición como el molinete, compuertas radiales o el perfilador horizontal ultrasónico de efecto doppler.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Algunas propiedades del agua

El agua es clasificada dentro de los fluidos, su constitución molecular puede cambiar continuamente las posiciones relativas de sus moléculas, sin ofrecer gran resistencia al desplazamiento entre ellas, aun cuando este sea muy grande. No tiene forma propia y adquiere la del recipiente que lo contiene.

En los cálculos de movimiento de fluidos, la viscosidad y la densidad son las propiedades del fluido que con más generalidad se utilizan; desempeñan los papeles principales en el movimiento en canales abiertos, (Streeter 1978).

2.1.1. Viscosidad

La viscosidad es la resistencia que presentan los fluidos a la deformación cuando se someten a un esfuerzo tangencial que explica su fluidez, (Mott 1996).

$$\mu = \tau \left(\frac{\sigma v}{\sigma y} \right)$$

Donde:

μ = La constante de proporcionalidad, que es una magnitud característica de la viscosidad del fluido (FL⁻²T)

τ = Esfuerzo de corte (FL⁻²)

v = velocidad (LT⁻¹) ó (m/s)

y = distancia de separación referenciada a la pared "espesor" (m)

2.1.2. Densidad

La densidad (ρ) representa la masa de fluido contenida en la unidad de volumen, (Sotelo 2002). Para definir la densidad en un punto se divide la masa Δm de fluido, en el volumen. Para el agua en condiciones estándar.

$$\rho = 101.94 \text{ UTM/m}^3$$

Su densidad no cambia bajo ninguna circunstancia, (Mott 1996).

2.1.3. Peso específico

El peso específico (γ) que representa el peso de fluido por unidad de volumen, (Sotelo 2002).

$$\gamma = \frac{w}{v}$$

Donde:

γ = Peso específico

v = Volumen (m^3)

w = Masa (kg)

Para el agua en condiciones estándar $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$

2.1.4. Presión

La presión es la cantidad de fuerza ejercida sobre un área unitaria de una sustancia, esto se puede establecer con la ecuación, (Streeter 1978):

$$p = \frac{F}{A}$$

Donde:

p = Presión (kg/m²)

F = Fuerza (kg)

A = Área (m²)

También se puede expresar en función de una longitud equivalente de una columna de fluido,

$$p = \gamma h$$

Donde:

p = presión (kg/m²)

γ = peso específico (kg/m³)

h = altura (m)

2.2. Importancia de la hidrometría

En la explotación de un sistema de riego es importante poder medir con exactitud el caudal en las derivaciones y en las tomas del canal de modo que el agua disponible pueda suministrarse a las zonas que verdaderamente la necesitan y evitar su distribución incorrecta.

La determinación de la cantidad de agua que lleva un canal se llama aforo y es importante para planificar el riego de un predio; conocer la cantidad de agua o

caudal que llega al predio es la base para diseñar un sistema de regadío. (Varas 1993)

El uso de información hidrométrica ordenada en un Distrito de Riego permite:

- a. Respetar los volúmenes asignados
- b. Evaluar los beneficios de las mejoras en la infraestructura
- c. Monitorear la ejecución de la distribución del agua de riego
- d. Determinar la eficiencia en el sistema de riego
- e. Dotar de información para los pronósticos de la disponibilidad de agua, información importante para elaborar el balance hídrico y planificar la distribución del agua de riego.

2.3. Canales

El agua de riego se conduce principalmente a través de canales, que se construyen de diferentes formas, tamaños y pendientes, lo que determina la cantidad de agua que pueden llevar, es decir, el caudal, que generalmente se mide en litros por segundo (lt/s), (Varas 1991).

Los canales son ductos abiertos en los cuales el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie del líquido está en contacto con la atmósfera. Un canal puede tener cualquier forma; de acuerdo con su origen puede ser natural o artificial, dentro de los primeros se incluyen todos los cursos que existen en forma natural tales como arroyos, ríos, etc. Dentro de los artificiales, los de navegación, obras de excedencia, y obras de riego, (Morales, 1979).

2.4. Estructuras de medición

En la medición de caudales también se utilizan algunas estructuras especialmente construidas, llamadas medidores o aforadores, cuyos diseños se basan en los principios hidráulicos de orificios, vertederos y secciones críticas.

2.4.1. Compuertas radiales

Las compuertas radiales son generalmente usadas en canales de sección rectangular para calcular los flujos del canal y controlar los niveles de agua.

La compuerta radial es un tipo de variable de los orificios, pueden ser libres o sumergidas Figura 1. Sin embargo, el cálculo preciso del flujo de entrada radial requiere un análisis complejo. El ángulo del borde inferior de la compuerta varía con la altura del piñón (h_P), con la apertura (w) y con el radio (r) de la compuerta. La contracción de flujo es sensible al tipo de borde inferior de la compuerta y a los niveles de agua. (Bureau of reclamation).

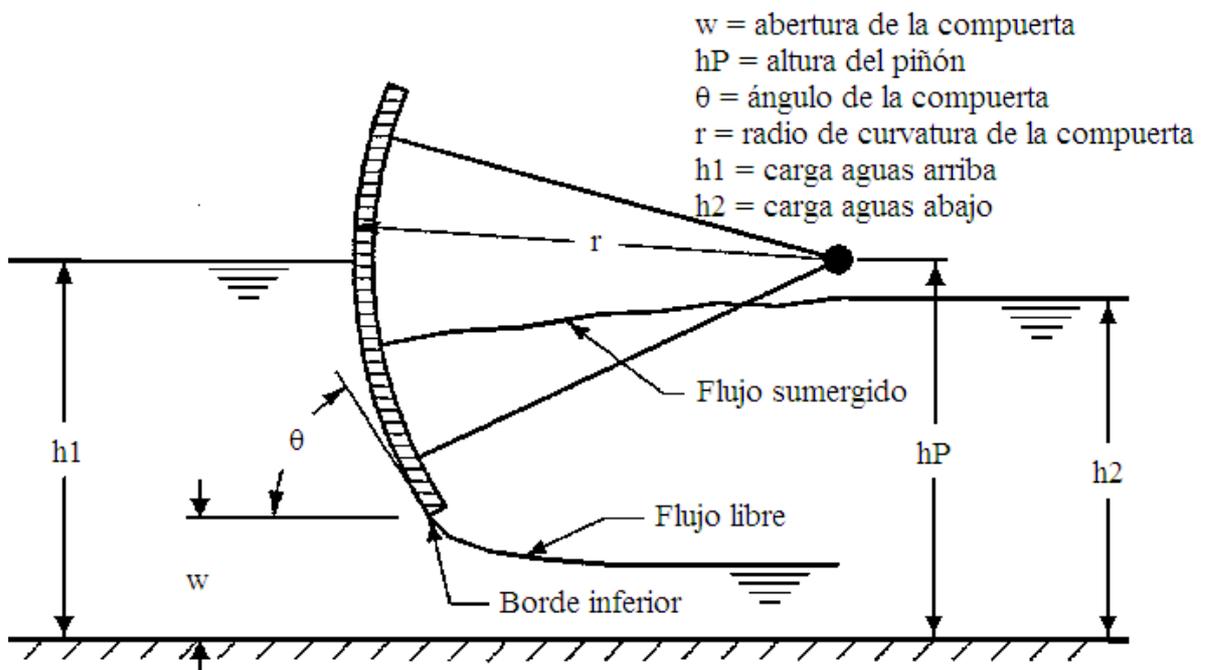


Figura 1. Flujo en una compuerta radial.

La ecuación general para el flujo a través de una compuerta radial se puede derivar de la ecuación de Bernoulli y se expresa como:

$$Q = C_d w b \sqrt{2gH}$$

Donde:

C_d = coeficiente de descarga

w = abertura de la compuerta (m)

b = anchura de la puerta (m)

g = constante gravitacional (m/s^2)

H = carga hidráulica (m), (Bureau of reclamation).

2.5. Métodos de aforo

Los principales métodos de aforo para la medida de caudales que se utilizan en el Distrito de Riego 005 Delicias se explican a continuación: el método de área-velocidad que incluye la técnica con flotador, con molinete y con medidores acústicos; aforo con compuertas como es el caso de compuertas radiales.

2.5.1. Método de Área-Velocidad

Uno de los métodos más utilizados; consiste en determinar el área de la sección transversal de la corriente y velocidad media del flujo, para obtener el gasto como producto del área por la velocidad, (IMTA-CNA, 2006) con la siguiente ecuación:

$$Q = AV$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

V = Velocidad (m/s)

A = Área (m^2)

2.5.1.1. Flotador

Los flotadores son objetos con peso específico menor al del agua (1000 kg/m³). Se recomiendan para determinar la velocidad en corrientes de agua pequeñas por ejemplo riego superficial, (IMTA-CNA 2006). El método del flotador se utiliza en los canales y acequias y da sólo una medida aproximada de los caudales. Su uso es limitado debido a que los valores que se obtienen son estimativos del caudal, siendo necesario el uso de otros métodos cuando se requiere una mayor precisión, (Osorio 1994).

Para estimar el gasto se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \mathfrak{R}AV$$

\mathfrak{R} es un factor de reducción igual a 0.9

Se selecciona un tramo de canal de distancia conocida (s) y se mide el tiempo (t) que tarda el flotador en viajar del inicio al final del tramo seleccionado, Figura 2. (Osorio 1994).

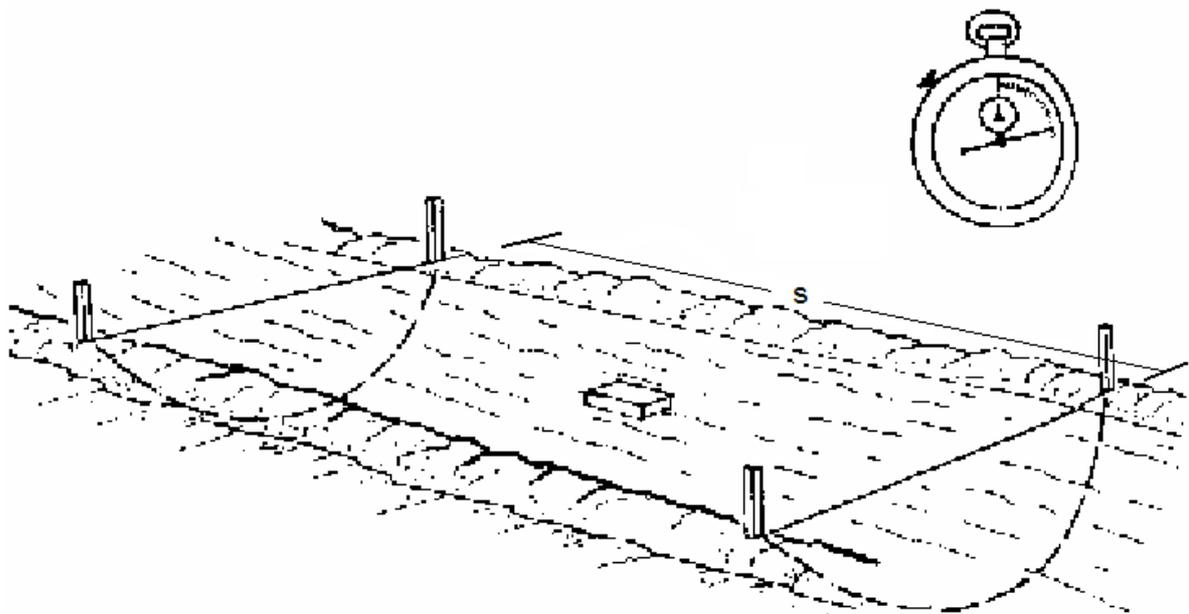


Figura 2. Medición de un tramo de canal.

2.5.1.2. Molinete

El método de aforo conocido como área-velocidad usa generalmente un medidor que puede ser un molinete.

El agua en movimiento hace girar una rueda con copas o una hélice del molinete, el número de revoluciones por segundo (rps) de la rueda o de la hélice, se relaciona con la velocidad del agua mediante la ecuación que caracteriza al molinete, (IMTA-CNA, 2006).

El sitio donde se realiza la medición puede ser una estación permanente o semipermanente localizada transversalmente al flujo; esta será localizada en un tramo recto donde la sección transversal es uniforme y bien definida. La estación debe estar lejos de flujos turbulentos provocados por una toma, compuerta u otra estructura derivadora. En las secciones de aforo seleccionadas se puede instalar un puente, un cable con canastilla o utilizar lancha una con la finalidad de dividir el ancho de la corriente en franjas, de igual anchura, que queden marcadas y sean la base para dividir la sección transversal de la corriente en áreas pequeñas, en las cuales se mide la velocidad media, (IMTA-CNA, 2006).

2.5.1.2.1. Área de la sección transversal del canal

Para obtener el área de la sección transversal se toman las medidas, iniciando por el ancho, dependiendo de su magnitud, se mide con una cinta de acero, y la profundidad es medida vertical a lo ancho del canal, suficiente para determinar la forma y área de la sección transversal, (Figura 3).

Para canales con sección trapezoidal el área total se determina con la ecuación:

$$A = y \left[\sqrt{(k^2 - y^2)} + b \right]$$

Donde:

A = Área hidráulica (m^2)

y = Profundidad; *Tirante* (m)

b = ancho de la base menor; *Plantilla* (m)

k = Talud (m)

2.5.1.2.2. Velocidad en la sección transversal del canal

El molinete se introduce en la corriente para determinar la velocidad de flujo. La velocidad varía a lo ancho de la sección transversal, (Figura 3) por lo que se divide la sección en partes y se mide la velocidad en el centro de cada una de ellas, repitiendo la medición por lo menos tres veces.

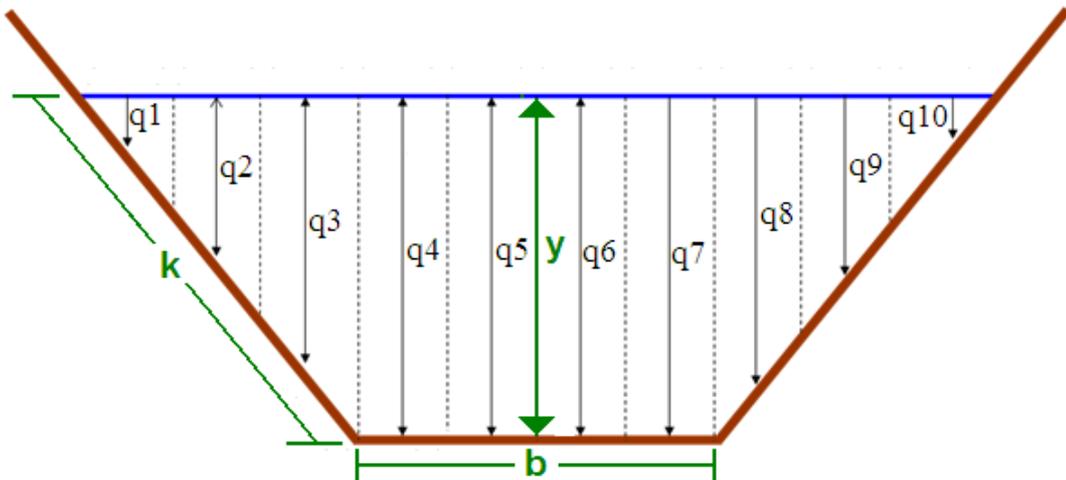


Figura 3. Dovelas verticales de una sección trapezoidal.

El gasto total (QT) es simplemente la suma de los gastos parciales (q_i) de cada dovela vertical:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

Los molinetes pueden ser de tres tipos: *mecánico* cuando un sistema de engranes proporciona el número de revoluciones, *electromecánico* cuando el conteo es mediante un circuito eléctrico y *electrónico digital* si un sistema de circuitos electrónicos integrados proporciona el número de revoluciones, (IMTA-CNA, 2006).

Cualquiera que sea el tipo de molinete debe estar previamente calibrado en un laboratorio, ya que si no se dispone de la tabla, gráfica o de la ecuación de calibración, la velocidad del agua no se puede determinar. Cada molinete dispone de su propia ecuación.

a) Molinete electromecánico. Actualmente los molinetes mecánicos prácticamente son los mismos que los electromecánicos, la diferencia es, que los electromecánicos tienen adaptado un sistema de señal eléctrica que se transforma en sonora para que sea detectado el número de vueltas al contar el número de sonidos. Por lo anterior, solo se presentan los molinetes electromecánicos.

En México se fabrican dos tamaños de molinete electromecánico de copas: El “Pigmeo o enano” (Figura 4), para baja velocidad de 0.06 a 7.6 m/s y corrientes pequeñas y el tipo “Price” (Figura 5) para alta velocidad de 0.06 a 7.6 m/s y corrientes grandes.



Figura 4. Molinete electromecánico de copas tipo “Pigmeo o enano”.

El tipo “Pigmeo” dispone de un contacto simple que registra una vuelta por señal y opcionalmente, un contacto doble que registra dos revoluciones por señal. El tipo “Price” dispone de dos contactos: el simple y el contacto penta que registra cinco vueltas por señal para altas velocidades del agua.

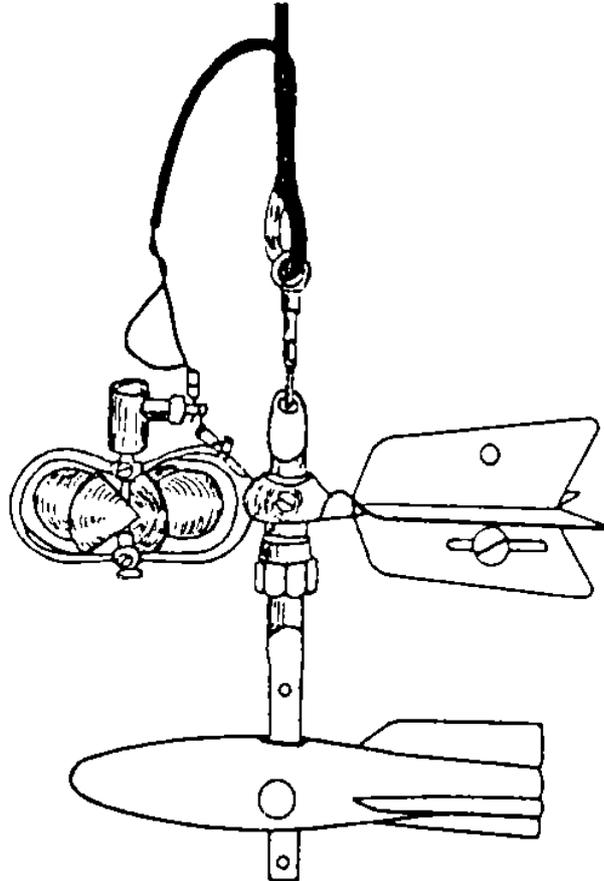


Figura 5. Molinete electromecánico de copas tipo “Price”.

b. Molinete electrónico digital. El principio de determinar la velocidad es idéntico al de los molinetes anteriores, la diferencia específica de éste tipo de molinetes electrónico - digitales, consiste en que la contabilidad del tiempo y las revoluciones de las copas, se realizan mediante un contador electrónico y un reloj integrado en un módulo con carátula digital que permite al operador, obtener directamente la velocidad del agua, cada unidad o modelo de molinete tiene integrada la ecuación de calibración.

2.5.1.3. Acústicos

Existen dos tipos de medidores ultrasónicos que emplean señales acústicas mediante la transmisión de pulsos (Figura 7), el primero de ellos denominado aforador de tiempo en tránsito (ATT), que consiste en un par de transductores que son colocados en posición fija sobre el talud en ambos lados del canal (dentro del agua), de manera tal que el ángulo entre el recorrido de la pulsación y la dirección de la corriente está entre 30 y 60 grados (Figura 6), el sistema es de auto calibración, y no son necesarias las mediciones con molinete. (García 1999).

Figura 6. Colocación de los transductores (1 y 2)

El tiempo que tardan las ondas en cruzar de aguas-arriba a aguas-abajo está directamente relacionado con la velocidad media del agua a la profundidad de los transductores. La velocidad puede estar relacionada con la velocidad media de la corriente de toda la sección transversal. Al incorporar un factor de área en el procesador electrónico, el sistema puede totalizar el caudal, (García 1999).



pulso
debe
tando
nto

Figura 7. Aforador de tiempo y tránsito (ATT)

En cambio el de Aforador Doppler horizontal (H-ADCP), (Figura 8), emplea la transmisión de una onda continua, y están diseñados para deslizarse en un dispositivo en forma vertical o inclinada. La estación se calibra por el método volumétrico, molinete, vertedores, orificios o por un aforador doppler vertical portátil llamado “el barquito” que es un sensor ultrasónico montado sobre un flotador y funciona como un molinete dovelando verticalmente, tiene el mismo principio que un AD horizontal a diferencia de su portabilidad, (Figura 9). Los medidores ultrasónicos Doppler cuentan con filtros especiales cuya finalidad es analizar las señales recibidas y rechazar las que estén dispersas.



Figura 8. Aforador ultrasónico de efecto doppler horizontal

Los medidores de caudal actuales del tipo efecto Doppler determinan velocidad midiendo el cambio de la frecuencia del sonido de la fuente, proveniente de reflexiones de partículas móviles en la corriente tales como burbujas pequeñas del sedimento, materia orgánica u otras partículas del fluido en movimiento.

Generalmente un transductor emite señales acústicas a una frecuencia conocida. Las ondas sonoras son reflejadas por las partículas en movimiento y luego son captadas por un receptor. El sistema analiza los cambios en las frecuencias de onda de salida y llegada. El resultado de estos cambios se relaciona directamente con la velocidad media del flujo, (IMTA-CNA, 2006).



Figura 9. Aforador ultrasónico de efecto doppler vertical “barquito”

2.6. Bases físicas de ultrasonido

Los ultrasonidos son sonidos cuya frecuencia es superior a 20 KHz (20,000 Hz), una frecuencia superior a la audible. La producción y recepción de ultrasonidos se realiza por medio de transductores. Los transductores son materiales piezoeléctricos, que por sus propiedades pueden relacionar energía eléctrica y mecánica. La producción de ondas ultrasónicas se realiza por los ciclos sucesivos de contracción - expansión que sufren estos materiales cuando se les aplica un campo eléctrico. Del mismo modo, cuando se comprimen y expanden se generan cargas eléctricas que permiten la detección de las ondas ultrasónicas, (Santos De La Cruz 2005).

2.6.1. Definición de ultrasonido

Son vibraciones mecánicas de la materia que se transmiten en forma de ondas de presión. Los ultrasonidos se propagan en forma de ondas longitudinales, en este tipo de ondas la dirección de propagación coincide con la de vibración, (Figura 10). La onda se transmite en forma de ciclos sucesivos, (IMTA-CNA 2006).

La distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado se llama longitud de onda λ .



Figura 10. Ultrasonido

Para que se propaguen por un medio, este debe tener dos propiedades, la inercia y la elasticidad. A diferencia de las ondas audibles, los ultrasonidos no pueden transmitirse por el aire, ya que cuanto mayor es la frecuencia, la onda necesita una mayor densidad/soporte del medio para su transmisión.

Por su naturaleza ondulatoria, los ultrasonidos van a presentar los fenómenos de reflexión, refracción, difracción, interferencia. De todos ellos el fenómeno más importante en este caso es la reflexión. Debido a ella, un haz ultrasónico que atraviese diferentes medios se refleja parcialmente generando una onda que "transporta" información de las características de los medios atravesados. Esta onda se llama eco, podrá ser detectada e interpretada obteniendo en este caso una imagen en dos dimensiones que nos va a permitir deducir las características de los medios atravesados (ecografía en modo B).

Los ultrasonidos se propagan en forma de ondas longitudinales. Las moléculas del tejido atravesado sufren ciclos de expansión y compresión (barras verticales).

2.6.2. Propiedades de la onda ultrasónica

Las ondas ultrasónicas poseen diferentes propiedades que se describen a continuación:

2.6.2.1. Velocidad

La velocidad de propagación es la distancia recorrida por la onda dividido por el tiempo empleado para recorrer esa distancia. La velocidad de los ultrasonidos en un tejido determinado depende de la densidad y elasticidad del medio que a su vez varían con la temperatura. La relación es directa, es decir, a mayor densidad del

2.6.2.4. Amplitud

Es el máximo cambio producido en la presión de la onda, es decir la distancia máxima que alcanza la partícula vibratoria desde su posición inicial de reposo “altura de la curva sinusoidal”, (Figura 11).

La amplitud se relaciona con la intensidad. De este modo si aumentamos la intensidad de una onda determinada aumentaremos su amplitud. Durante la transmisión de las ondas, por efecto de su interacción con el medio, disminuye la intensidad de la onda en función de la distancia recorrida y como consecuencia se produce una disminución de su amplitud, (IMTA-CNA, 2006).

La unidad física que se emplea para representar la amplitud de los ultrasonidos es el belio (B), que valora la intensidad del sonido. Sin embargo en la práctica se utiliza el decibelio (dB) que es la décima parte del belio. El belio es una medida de una potencia de salida comparada con otro nivel de potencia, que se usa como referencia por lo que no se puede definir un valor fijo para definirlo, (Ruiz, 2004)

2.6.2.5. Período

Es el tiempo (P) de una oscilación completa, es decir lo que tarda el sonido en recorrer una longitud de onda, (Figura 12), (Santos De La Cruz 2005).

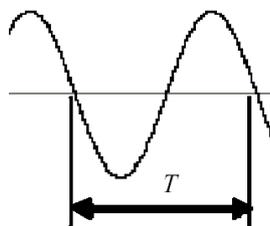


Figura 12. Período (T) de una onda ultrasónica.

2.6.2.6. Intensidad

Es la energía que pasa por segundo a través de una superficie de área, unidad colocada perpendicularmente a la dirección de propagación del movimiento. La intensidad disminuye con la distancia, (IMTA-CNA, 2006).

El sonido se puede definir según la acústica física como una vibración mecánica longitudinal capaz de producir una sensación auditiva, y según la acústica fisiológica es la sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico.

2.7. Principios físicos del efecto Doppler

Cuando la fuente de ondas y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Doppler en honor a su descubridor Johann Christian Doppler, (IMTA-CNA, 2006).

2.7.1. El emisor esta en reposo ($v_E = 0$)

Se dibujan los sucesivos frentes de ondas que son circunferencias separadas, centradas en el emisor (+). El radio de cada circunferencia es igual al producto de la velocidad de propagación (v_s) por el tiempo transcurrido (P) desde que fue emitido. La separación entre dos frentes de onda es una longitud de onda, $\lambda = v_s P$, (Figura 13), (IMTA-CNA, 2006).

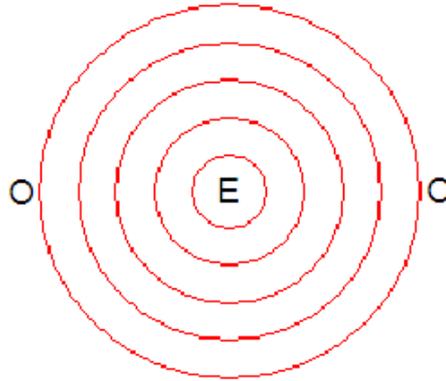


Figura 13. Ondas de emisor en reposo

La longitud de onda (λ) medida por el emisor (E) y por el observador (O) es la misma, una unidad, $\lambda_E / \lambda_O = 1$.

2.7.2. Cuando el emisor está en movimiento ($v_E < v_s$)

Consideramos primero el caso de que la velocidad del emisor (v_E) sea menor que la velocidad de propagación de las ondas en el medio (v_s).

Si el movimiento del emisor va de izquierda a derecha (velocidades positivas), la longitud de onda medida por el observador situado a la derecha es más pequeña que la unidad, y la longitud de onda medida por el observador situado a la izquierda del emisor es mayor que la unidad, (Figura 14), (IMTA-CNA, 2006).

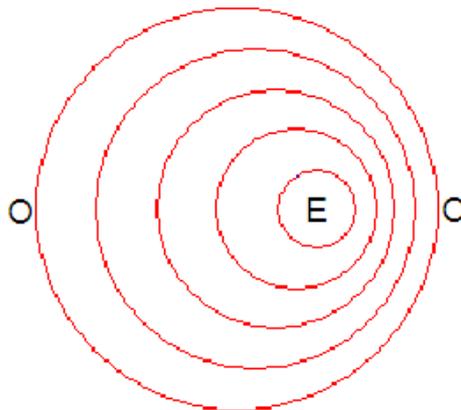


Figura 14. Ondas de emisor en movimiento

- Observador situado a la derecha del emisor $\lambda_o < 1$
- Observador situado a la izquierda del emisor $\lambda_o > 1$

Como $\lambda = vP$, o bien $\lambda = \frac{v}{f}$, hay una relación inversa entre longitud de onda λ y la frecuencia f .

- Observador situado a la derecha del emisor $f_o > f_E$
- Observador situado a la izquierda del emisor $f_o < f_E$

Si el emisor emite ondas sonoras, el sonido escuchado por el observador situado a la derecha del emisor, será más agudo y el sonido escuchado por el observador situado a la izquierda será más grave. En otras palabras, cuando el emisor se acerca al observador, éste escucha un sonido más agudo, cuando el emisor se aleja del observador, éste escucha un sonido más grave.

2.7.3. Cuando el emisor esta en movimiento ($v_E = v_s$)

Cuando la velocidad del emisor v_E sea igual que la velocidad de propagación de las ondas en el medio, la longitud de onda medida por el observador situado a la derecha del emisor es cero. Si el emisor es un avión que va a la velocidad del sonido, los sucesivos frentes de las ondas emitidas se agrupan en la punta o morro del avión (Figura 15), (IMTA-CNA, 2006).

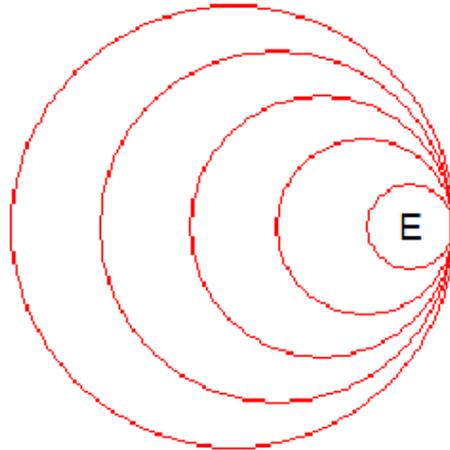


Figura 15. Ondas de emisor a la velocidad de propagación

2.7.4. Cuando el emisor está en movimiento ($v_E > v_s$)

Cuando la velocidad del emisor v_E sea mayor que la velocidad de propagación de las ondas en el medio, el movimiento ondulatorio resultante es entonces una onda cónica (la envolvente de los sucesivos frentes de onda es un cono con el vértice en el emisor), esta onda se llama onda de Mach u onda de choque, y no es más que el sonido repentino y violento que oímos cuando un avión supersónico pasa cerca de nosotros. Estas ondas se observan también en la estela que dejan los botes que se mueven con mayor velocidad que las ondas superficiales sobre el agua, (IMTA-CNA, 2006).

La envolvente, es la recta tangente común a todas las circunferencias. En el espacio, los frentes de onda son esferas y la envolvente es una superficie cónica, (Figura 16).

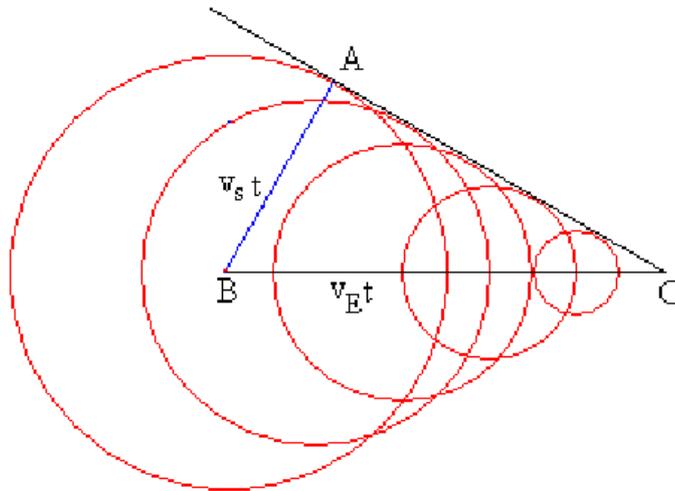


Figura 16. Ondas de emisor en movimiento

En el instante $t = 0$, el emisor se encuentra en B, emite una onda que se propaga por el espacio con velocidad v_s . En el instante t el emisor se encuentra en O, y se ha desplazado $v_E \times t$, En este instante, el frente de onda centrado en B tiene una radio $v_s \times t$.

En el triángulo rectángulo OAB el ángulo del vértice es $\text{sen } \theta = \frac{v_E}{v_s}$. Este cociente se denomina número de Mach.

2.8. Instrumentación de la medida del caudal

Seleccionar el dispositivo de medición mas adecuado para un sitio en particular o situación no es fácil. Hay muchos factores que deben ser considerados. Cada sistema tiene requerimientos y situaciones de operación únicos.

2.8.1. Requerimientos generales

Las leyes del gobierno y los contratos deben ser revisados para las posibles restricciones antes de seleccionar el dispositivo de medición. Los acuerdos

contractuales para la compra de bombas, turbinas, y dispositivos de medición de agua para los distritos frecuentemente dictan el sistema de medición requerido en conformidad antes del pago. Estas restricciones pueden estar en términos de precisión, comparación específica de dispositivos, y procedimiento.

2.8.2. Tipos de dispositivos de medición

Los operadores de un sistema de riego comúnmente utilizan varios tipos estándar de dispositivos de medición de agua. Los vertedores, aforadores, orificios, y medidores de corrientes son los dispositivos más usados en canales de riego.

2.8.3. Selección de los dispositivos de medición

Los factores principales que influyen en la selección de los dispositivos de medición de flujo son: requisitos en la precisión; costo; restricciones legales; rango en la descarga; pérdida de carga; adaptabilidad en las condiciones locales; adaptabilidad para condiciones de operación variables; tipo de medición y necesidades de registro; requerimientos en la operación; habilidad para dejar pasar sedimentos y desechos; tiempo de funcionamiento en el ambiente dado; requerimientos en el mantenimiento, requerimientos en la construcción e instalación; y estandarización y calibración del dispositivo, (IMTA-CNA, 2006).

2.9. Medidor ultrasónico de efecto doppler

El funcionamiento del medidor ultrasónico de efecto doppler o Channel Master horizontal ADCP (como es llamado por la empresa fabricante RDI) es un proceso de cambio de frecuencia en una emisión sonora, (IMTA-CNA, 2006). La propagación del sonido en un medio dispersivo, un fluido, depende de la temperatura. Esto significa que el medidor de efecto doppler determina únicamente las variables; temperatura, cambio de frecuencia de la onda emitida y el voltaje de una corriente eléctrica.

2.9.1. Componentes

El medidor ultrasónico de efecto doppler está integrado por varios componentes cada uno con una función específica, a continuación se describe cada uno de ellos.

2.9.1.1. Cubierta

La cubierta de plástico le permite instalarse en profundidades de hasta 200 m.

2.9.1.2. Transductor Horizontal

Son los dos grandes componentes circulares color rojo que generan las ondas de sonido las cuales el medidor usa para calcular la velocidad del sonido.

2.9.1.3. Transductor Vertical

Componente pequeño circular de color rojo para medir el nivel de profundidad.

2.9.1.4. Sensor de Presión

El sensor de presión que se llena con aceite, mide la corriente eléctrica, y está localizado al lado opuesto del transductor vertical.

2.9.1.5. Sensor de Temperatura

Localizado al frente entre los transductores horizontales, también es usado para calcular la velocidad del sonido.

El medidor calcula el gasto en función de dos variables: el área hidráulica (nivel) y la velocidad media.

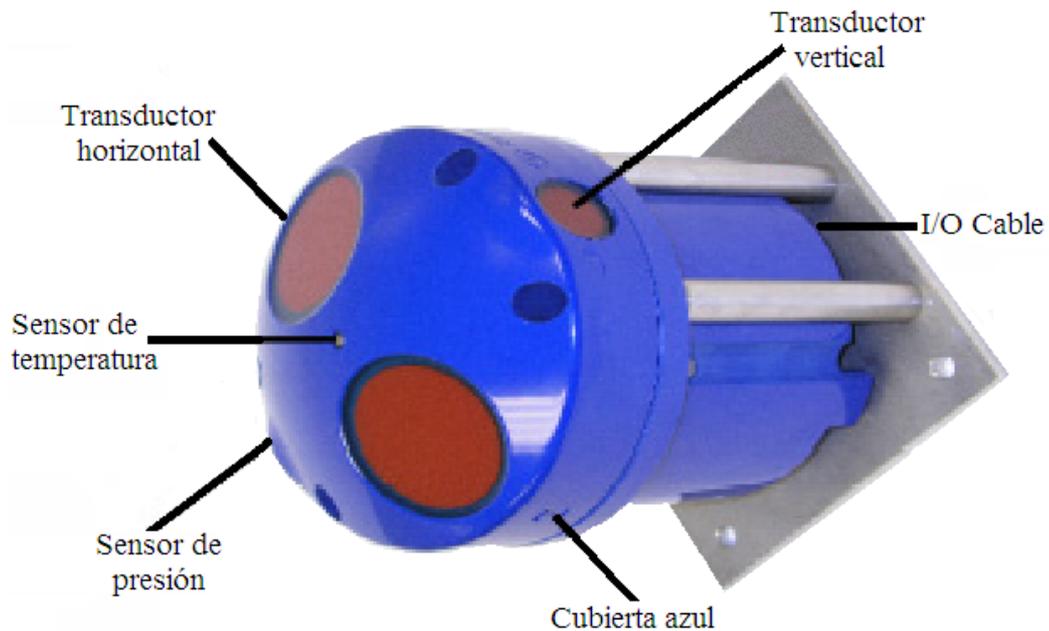


Figura 17. Componentes del medidor ultrasónico de efecto doppler.

A continuación se explica cómo el medidor de gasto de efecto doppler mide cada una de ellas.

2.9.2. Medición del área hidráulica

El medidor de efecto doppler calcula el área hidráulica en función del tipo de sección y profundidad de agua. Para medir la profundidad se utiliza un *transductor*. Dispositivo que proporciona una salida eléctrica en respuesta a una magnitud física que se desea medir. En este caso se desea medir la profundidad del agua, pero lo que realmente se mide es la presión, (IMTA-CNA, 2006).

Esto tiene su explicación en el hecho de que mientras más profundidad se tenga, mayor presión se presentará. Esto se explica a continuación: el agua ejerce una presión sobre un material especial sujeto a una corriente eléctrica; dicho material

puede ser silicio incorporado a un diafragma. Cuando el diafragma está plano (sin presión) presenta cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica, y cuando está deformado presenta otra. Esta diferencia de resistencia (medida en voltaje) es la que registra el dispositivo y la transforma, por medio de fórmulas, primero a presión y después a profundidad de agua. Después que se tiene la profundidad del agua se puede calcular el área hidráulica. En el caso de secciones geométricas sencillas como el rectángulo o el trapecio (Figura 18), las fórmulas son las siguientes:

Para el rectángulo:

$$A = BY$$

Para el trapecio:

$$A = Y (\sqrt{k^2 + Y^2} + B)$$

En las fórmulas anteriores:

A = área hidráulica (m²)

Y= profundidad (también llamada *tirante*) (m)

B = ancho de la base menor (plantilla) (m)

k = talud (m)

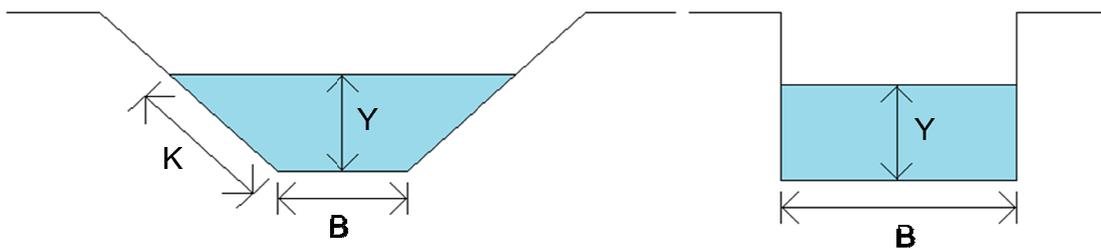


Figura 18. Secciones geométricas del canal

2.9.3. Medición de la velocidad media

Como su nombre lo indica, este dispositivo utiliza el llamado efecto doppler para medir la velocidad en la corriente. El efecto doppler es la alteración de la frecuencia de las ondas, en función del movimiento, ya sea del receptor o del emisor de ondas, (IMTA-CNA, 2006).

Este efecto se produce en todos los tipos de ondas, ya sean sonoras, luminosas o de radio. Precisamente la alteración de las ondas de sonido, o mejor dicho de ultrasonido, es lo que utiliza el medidor de efecto doppler. El ultrasonido es un sonido con frecuencia más alta que la perceptible por el oído humano. El medidor tiene emisores y receptores de ondas de ultrasonido. Primeramente el emisor envía una onda a una determinada frecuencia y el receptor capta las ondas con otra frecuencia que son reflejadas en el agua, inclusive, la onda puede reflejarse en partículas de sólidos en suspensión o en burbujas de aire. Si el agua está en movimiento, las ondas reflejadas tendrán una frecuencia diferente de la emitida; la diferencia de frecuencia indica al dispositivo la velocidad de la corriente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del sitio experimental

El Distrito de Riego 005 Delicias pertenece a la Región Hidrológica No. 24 poniente que abarca parte de los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila, se ubica en la mesa del norte de la zona centro sureste del estado de Chihuahua y está integrado parcial o totalmente por los municipios de Camargo, La Cruz, Saucillo, Delicias, Rosales, Meoqui y Julimes, (Figura 19).

3.2. Características físicas del Distrito de Riego 005 Delicias

Su altura sobre el nivel del mar fluctúa entre 1110 a 1400 msnm con suelos de pendientes suaves en las partes bajas de los ríos Conchos y San Pedro, su clima seco es muy desértico, con régimen de lluvias en verano y con por lo menos diez veces mayor cantidad de lluvia el mes más húmedo que es septiembre.

La precipitación media anual es de 334 mm., evaporación de 2300 mm., y temperaturas de 17° C., el 60 % de su superficie son texturas ligeras franco arenosas y arenas; 21% texturas medias y el 19% texturas pesadas. Esto indica que el 80% de los suelos tienen baja capacidad de retención de humedad y porosidad mínima con alta percolación y lixiviación.

3.3. Localización del punto de medición

El punto de medición fue el km-106 del Canal Principal “San Pedro” (Figura 20).

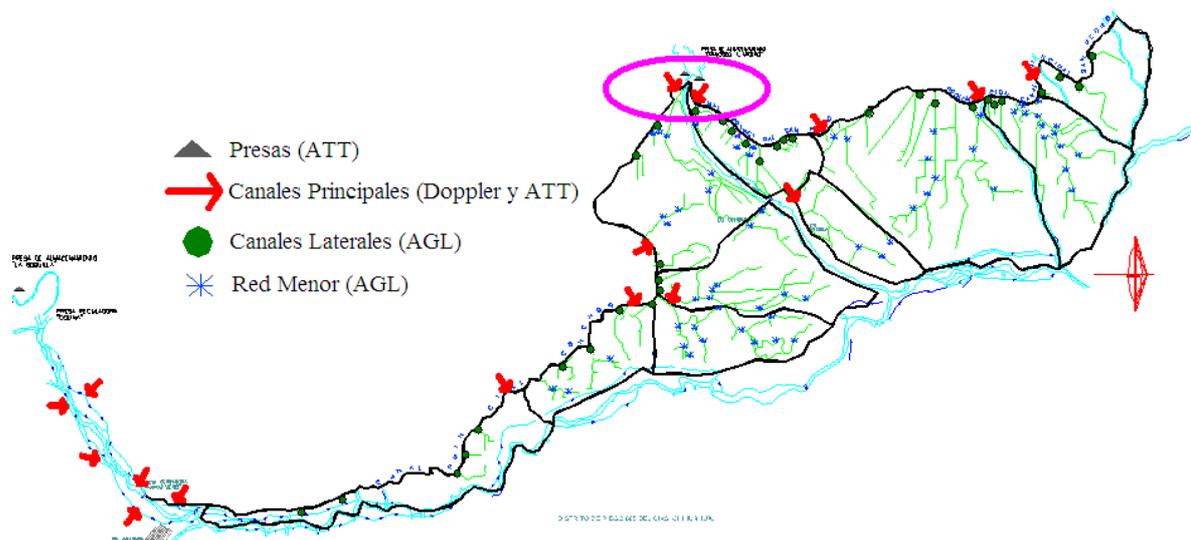


Figura 20. Distribución de los diferentes equipos de medición

El Distrito de Riego 005 se divide en dos unidades, Unidad 1 “Conchos” y Unidad 2 “San Pedro”, las mediciones de volumen fueron para la Unidad 2. El punto de entrega para la Unidad 2 es en el km 106 del Canal Principal “San Pedro”, (Figura 21), donde se utilizó el molinete y el perfilador H-ADCP como instrumentos de medición, mientras que aguas arriba en el último punto de control de la Unidad 1, el volumen se determinó por medio de compuertas radiales incluyendo las extracciones de la presa Fco. I. Madero.

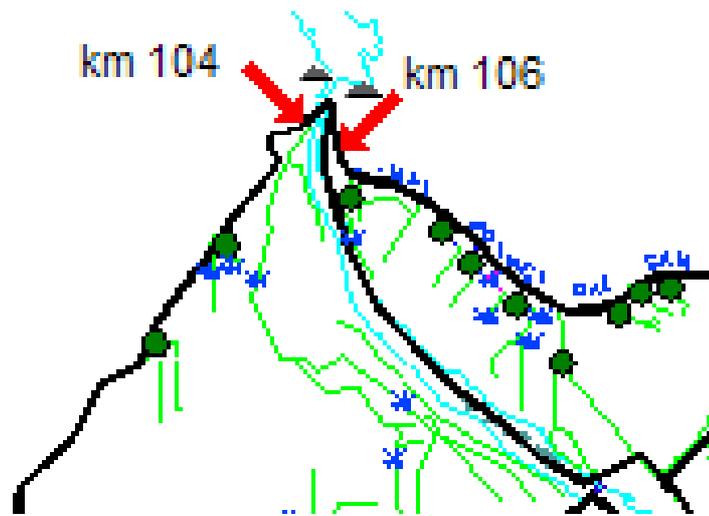


Figura 21. Localización de los puntos de medición.

3.4. Toma de datos

Se tomaron datos tanto del perfilador H-ADCP, del molinete y de las compuertas radiales para hacer una tabla comparativa de los aforos de cada una de las técnicas de medición.

Las observaciones se realizaron diariamente durante el ciclo 2007-2008 que comprende desde el mes de marzo hasta agosto, tomando como referencia el ciclo anterior y parte del posterior.

3.4.1. Aforo con molinete

El molinete fue utilizado como instrumento de medición en el km 106 del C.P. San Pedro.

3.4.2. Compuertas radiales

Se realizaron tomas de lecturas diarias de la escala y abertura de las compuertas radiales para calcular el volumen con sus respectivas tablas.

3.4.3. Aforo con medidor ultrasónico de efecto doppler

El medidor ultrasónico de efecto doppler se utilizó como instrumento de medición en el km 106 del C.P. San Pedro.

Para la extracción de los datos se necesitaron de dos software previamente instalados: El BBTalk, es un programa emulador terminal que permite a la computadora comunicarse con el Channel Master vía RS 422 (Default) ó RS 232, (Figura 22). Y el WinH-ADCP es un programa para la recolección de datos de descarga en tiempo real para el Channel Master horizontal, (Figura 23).

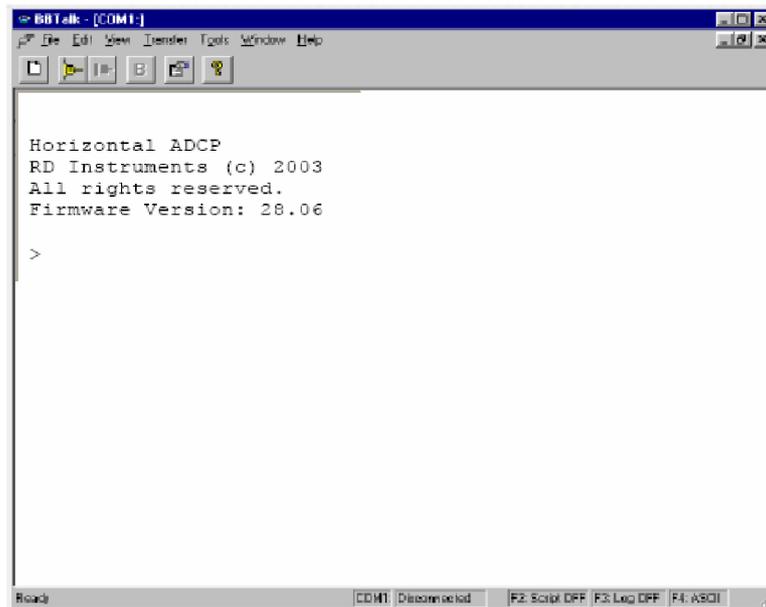


Figura 22. Ventana principal del BBTalk.

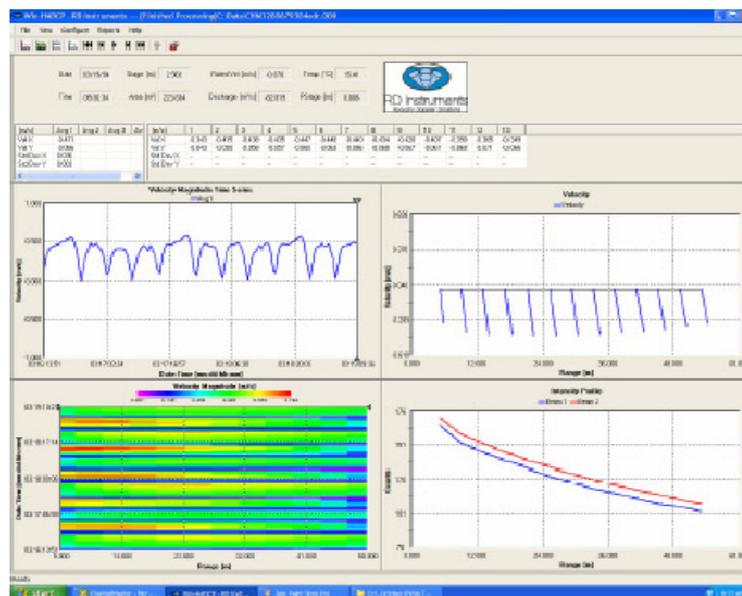


Figura 23. Ventana de observación el WinH-ADCP

Los datos se extrajeron por medio de un ordenador portátil guardándose en el programa (WinH-ADCP) compatible, (Figura 24).



Figura 24. Extracción de datos por medio de un ordenador portátil.

Se inició el programa WinH-ADCP con un doble click sobre el icono WinH-ADCP, cuando el programa se ejecutó se seleccionó **Setup Wizard** del menú **Configure**. Sobre la ventana de diálogo **Start**, y se presionó **Real-Time Data Acquisition**, (Figura 25).



Figura 25. Ventana de diálogo Star del WinH-ADCP.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 26 presenta los volúmenes totales mensuales medidos con las diferentes técnicas, donde se puede observar que no hubo diferencia significativa. Excepto el mes de abril donde se presenta una diferencia debido los días 15 y 16 donde se presentaron problemas técnicos con el aforador doppler lo que ocasionó una subestimación del volumen de 2.366 Mm³/s (Millones de metros cúbicos).

En el mes de agosto se observa una mayor diferencia de volumen entre las técnicas de medición. Las lecturas del aforador doppler y molinete subestimaron el volumen medido con la compuerta esto es debido a que se derivó un volumen de agua por el cauce natural del Rio San Pedro, entrega que se hace aguas arriba del km 106 y aguas abajo del km 104. La diferencia de volumen medido con el aforador doppler y molinete se debió a que con el tiempo se va acumulando azolve en el fondo del canal lo que modifica el área hidráulica, adicionalmente el flujo del canal osciló constantemente debido al cierre de las presas al término del riego.

Lo antes mencionado generó una diferencia en la determinación de los volúmenes del -12% y 10% respectivamente presentadas en el cuadro 1.

De acuerdo con los técnicos que operan el Distrito de Riego para establecer si una medición es confiable o no, esta no debe tener una diferencia de $\pm 5\%$ de su volumen real.

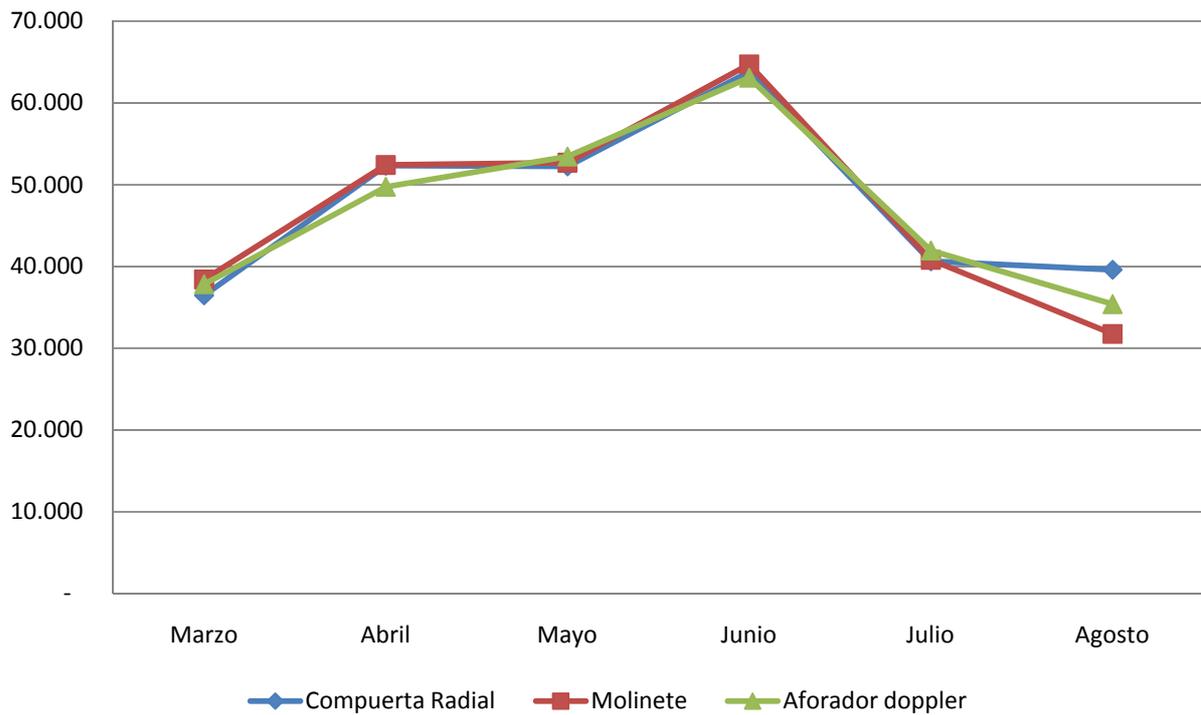


Figura 26. Volumen mensual total de las compuertas radiales, molinete y el aforador de efecto doppler. C.N.A.- U.A.A.A.N.- U.L. 2008.

Cuadro 1. Diferencia de volúmenes aforados respecto al AD (%)

Mes	km 104 Compuerta Radial	km 106 Molinete
Marzo	4	-2
Abril *	-5	-5
Mayo	2	1
Junio	-1	-3
Julio	3	3
Agosto *	-12	10

* Problemas técnicos con el aforador doppler

V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos del presente estudio, se concluye que de las diferentes técnicas de medición de caudal, el aforador doppler y el molinete son instrumentos confiables de los cuales se obtienen resultados similares sin diferencia significativa ya que son dos técnicas de aforo que se realizan bajo el mismo método (área-velocidad) y su error típico es de ± 5 %.

VI. LITERATURA CITADA

Bureau of Reclamation, 2001. Water measurement manual. 3^a Edition. Department of interior. USA.

García, L.G. 1999. Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado. ITGE. Centro Español de Metrología. Madrid, España.

Gardea Villegas, H. 1999. Hidráulica de canales. 3^a ed. México, UNAM, Facultad de Ingeniería. p. 6-9

IMTA-CNA. 2006. Física Acústica. México.

IMTA-CNA. 2006. Guía para configurar el Channel Master. México.

IMTA-CNA. 2006. Instructivo de medición. México.

IMTA-CNA. 2006. Manual de hidrometría avanzada en canales abiertos. México.

IMTA-CNA. Serie autodidáctica de medición del agua. Medidor ultrasónico de efecto doppler para canales.

Mott, R. L. 1996. Mecánica de fluidos aplicada. México, p. 48 y 49

Morales, J. 1979. Apuntes de Hidráulica I.

Naudascher, E. 2002. Hidráulica de canales. 3^a ed. México, LIMUSA, p. 21-26

Osorio, A., Mesa, F. y Salinas R. 1994. INIA-INTIHUASI, Proyecto PROMM. IV región. Cartilla divulgativa N° 05.

Programa Nacional Hidráulico 2007- 2012.

Ruiz, P. P. 2004. Fundamentos de acústica física. Dpto. Física aplicada. Universidad de Granada. España.

Santos De La Cruz. E. *et al.* 2005. El ultrasonido y su aplicación. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial. Vol 8 (1): pp 25-28.

SEMARNAT-IMTA. 2008. Procedimiento para operación y mantenimiento de aforadores de velocidad y nivel tipo doppler. Coordinación de hidráulica. México.

Sotelo Ávila, G. 2002. Hidráulica General Fundamentos. 5ª ed. Vol 1. México, LIMUSA, p. 15-26 y 111-131.

Streeter, V. L. 1978. Mecánica de los fluidos. 4ª ed. México, McGraw-Hill, p. 13-24 y 118-136.

Varas, E. B. y Cabas, N. M. 1993. Aforos o mediciones de agua en canales. Serie Quilamapu N° 38. Chile

Varas, E. B. y Sandoval, J. H. 1991. Manual de riego. Serie Quilamapu N° 28. Chile.

VII. APÉNDICE

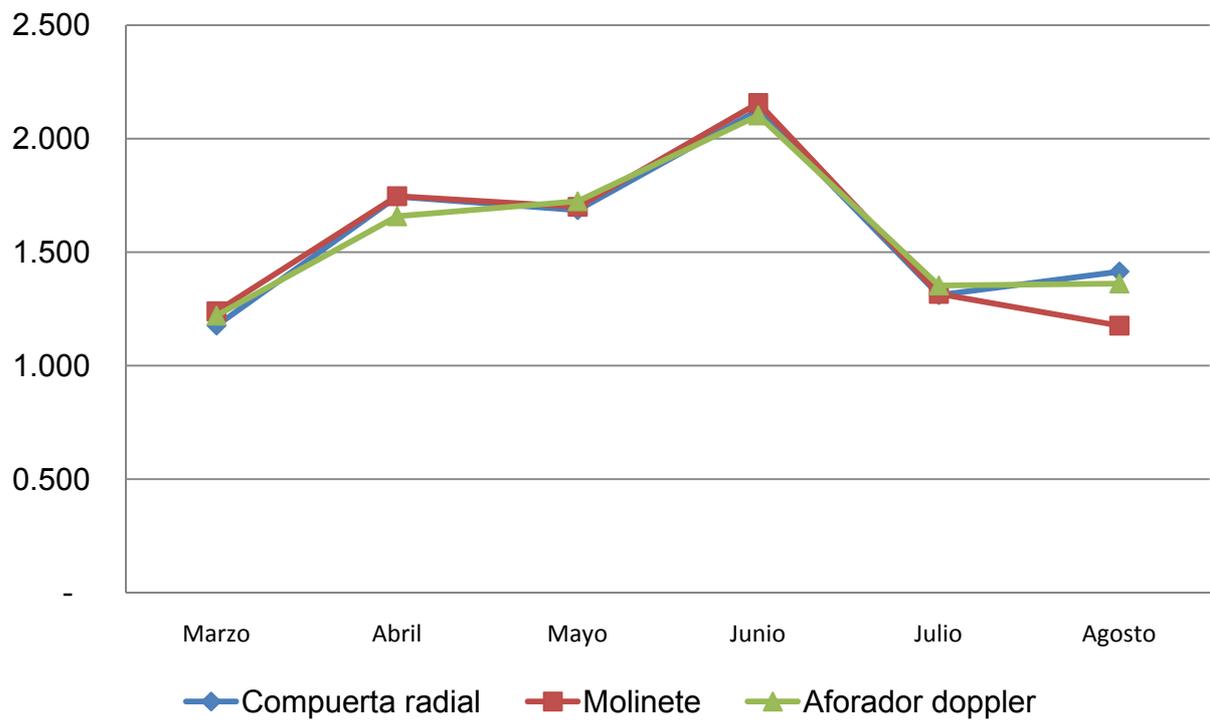


Figura 27. Volumen mensual promedio de las compuertas radiales, molinete y el aforador de efecto doppler. C.N.A.- U.A.A.A.N.- U.L. 2008.

Cuadro A1. Volumen total mensual (Mm³) usando las compuertas radiales, el molinete y el medidor de efecto doppler. C.N.A. – U.A.A.A.N. – U.L. 2008.

Mes	km 104 Compuerta Radial	km 106 Molinete	km 106 Aforador Doppler
Marzo	36.472	38.414	37.835
Abril	52.333	52.409	49.746
Mayo	52.247	52.696	53.446
Junio	63.797	64.722	63.079
Julio	40.643	40.817	41.947
Agosto	39.606	31.756	35.405

Cuadro A2. Volumen promedio diario (Mm³) usando las compuertas radiales, el molinete y el medidor de efecto doppler. C.N.A. – U.A.A.A.N. – U.L. 2008.

Mes	km 104 Compuerta Radial	km 106 Molinete	km 106 Aforador Doppler
Marzo	1.177	1.239	1.220
Abril	1.744	1.747	1.658
Mayo	1.685	1.700	1.724
Junio	2.127	2.157	2.103
Julio	1.311	1.317	1.353
Agosto	1.415	1.176	1.362