

PROYECTO HC-0907.1
**“RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA INSTALACIÓN Y
USO DE MEDIDORES DE FLUJO”**



INFORME FINAL

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA
DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA



IMTA
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE UN PERFILADOR ACÚSTICO FIJO DE EFECTO DOPPLER



Serge Tamari

**Coordinación de Hidráulica
Subcoordinación de Hidráulica Ambiental**

2009



IMTA[®]
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua



Tamari S. 2009. Metodología de calibración de un perfilador acústico fijo de efecto Doppler. Documento de curso (versión 1.2). IMTA, Jiutepec (Mor.). 35 p.



Índice

1. Introducción	1
1.1. Propósito y alcances	1
1.1.1. Propósito	1
1.1.2. Alcances	2
1.2. Definiciones	3
1.2.1. Terminología relacionada con el aforo en canales	3
1.2.2. Terminología relacionada con la calidad de una medición	4
1.2.3. Forma de reportar y acreditar los resultados de las mediciones	5
1.3. Fundamentos: Necesidad de calibrar un AD	6
1.3.1. Estimación del gasto con un AD	6
1.3.3. Segunda calibración: relación entre velocidad medida y velocidad media	7
2. Elegir tres sitios	9
2.1. Elegir los sitios para el uso del AD y su calibración	9
2.1.1. Importancia de contar con una forma de calibrar el AD en sitio	9
2.1.2. Definir los sitios relacionados con el uso y la calibración de un AD	9
2.1.3. Requisitos del sitio "A" (donde se encuentra el AD)	9
2.1.4. Requisitos del sitio "B" (a la altura del cual el AD estima el gasto)	10
2.1.5. Requisitos del sitio "C" (donde se hacen los aforos de referencia)	10
2.2. Marcar los sitios	11
2.2.1. Forma general de marcar los sitios	11
2.2.2. Marcar el sitio "A"	11
2.2.3. Marcar el sitio "B"	12
2.2.4. Marcar el sitio "C"	12
2.3. Documentación por entregarse	13
3. Establecer la relación "tirante - área hidráulica"	15
3.1. Medir la sección transversal a altura del sitio "B"	15
3.1.1. Requisitos	15



3.1.2. Técnicas que pueden usarse	15
3.2. Calcular la relación entre tirante y área.....	16
3.3. Documentación por entregarse.....	16
4. Elegir la técnica de aforo que se usará para calibrar un AD	18
4.1. Consideraciones generales	18
4.2. Método "área - velocidad" (con dovelas verticales).....	19
4.2.1. Fundamentos del método "área - velocidad"	19
4.2.2. Selección de un sitio para poder aplicar el método	19
4.2.3. Procedimiento general para aplicar el método	20
4.2.4. Cálculo del gasto.....	22
4.3. Técnicas compatibles con el método "área - velocidad"	22
4.3.3. Algunos requisitos específicos de los medidores que pueden usarse.....	24
4.4. Documentación por entregarse.....	24
5. Establecer la relación "velocidad medida - velocidad media"	29
5.1. Preparar la caracterización	29
5.2. Realizar una serie de aforos	30
5.3. Calcular la relación entre velocidades	30
5.4. Documentación por entregarse.....	30
6. Programar el AD y entregarlo.....	32
6.1. Programar el AD en forma definitiva.....	32
6.2. Entregar el AD calibrado	32
6.2.1. Entrega y recepción del AD.....	32
6.2.2. Entrega de un informe final sobre el proceso de calibración	32
6.3. Garantía sobre la calibración de un AD.....	33
6.3.1. Condiciones de garantía	33
6.3.2. Procedimiento para verificar la calibración de un AD	33
6.3.3. Alcances de la calibración de un AD.....	33
7. Conclusión	35

1. Introducción

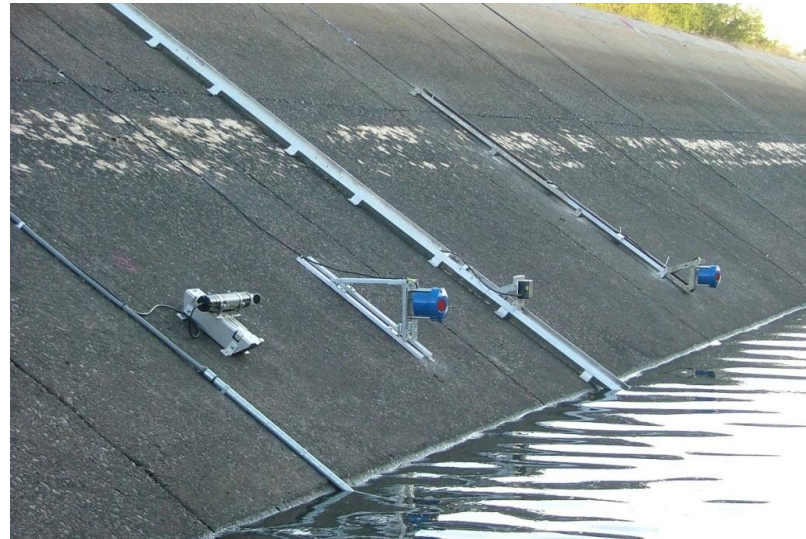
1.1. Propósito y alcances

1.1.1. Propósito

Un AD (Aforador Doppler) es un sistema automático que se utiliza para monitorear el gasto en canales. En la actualidad, existen dos formas de instalar este sistema en un canal:

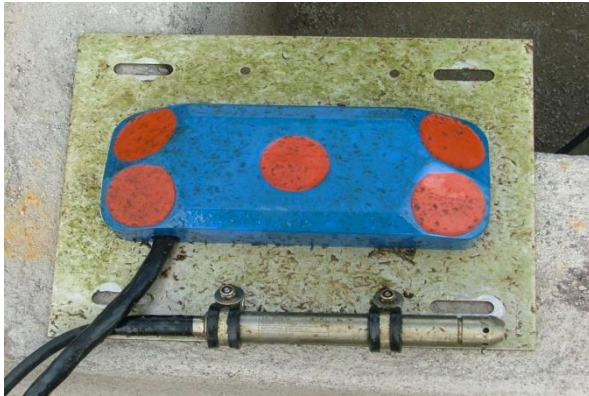
- Aforador Doppler Lateral (ADL)
- Aforador Doppler de Fondo (ADF)

⚠ Es un requisito calibrar en sitio un AD después de haberlo instalado en un canal, para que pueda estimar adecuadamente el gasto. En este documento se describe el procedimiento que un contratista debería llevar a cabo para calibrar un sistema AD.



De izquierda a derecha: SLD (marca OTT), HADFM (marca ISCO), Argonaut-SL (marca Sontek) y ChannelMaster (marca RDI)

Foto 1.1. Aforadores Doppler Laterales (ADL)



ADF Pro-20 (marca ISCO) con sensor de presión sumergible (marca KPsi)



Argonaut-SW (marca Sontek)

Foto 1.2. Aforadores Doppler de Fondo (ADF)

1.1.2. Alcances

En la actualidad, las mayoría de las organizaciones (empresas o Institutos) que realizan aforos en canales de riego o ríos no cuentan con una acreditación oficial (tipo norma ISO 17025: 2005) para poder entregar certificados de calibración (o de verificación) que tengan un valor legal. En este contexto, el presente documento no exige a las personas que calibran un AD entregar un certificado de calibración que tenga un valor desde el punto de vista de la metrología legal; a cambio, se solicitan diversos documentos para asegurarse de que la calibración del AD se ha llevado a cabo cuidadosamente (véase incisos [3.3]. [4.4] y [5.6]).

En este documento, se asume que el AD ha sido instalado en un canal con las siguientes características:

Ancho del canal	ADL: entre 1 y 60 m	ADF: entre 0.5 y 5 m
Tirante	ADL: entre 0.5 y 6 m	ADF: entre 0.3 y 5 m
Tirante mínimo	siempre hay por lo menos 0.30 m de agua sobre el AD	
Velocidad del agua	entre 0.25 y 4 m/s	
Calidad del agua	la salinidad del agua no varía de más de ± 5 mg/L	
Clima	El agua nunca llegue a congelarse	

Además, se asume que el proveedor después de la calibración habrá colocado sellos sobre los tornillos que sujetan el AD, para poder comprobar que nadie ha intentado mover el aparato mientras los sellos son intactos.

1.2. Definiciones

1.2.1. Terminología relacionada con el aforo en canales

AD	Aforador Doppler. ¹ Se trata de un equipo de medición fijo, que puede ser "lateral" (ADL) o "de fondo" (ADF). Cuenta con un sensor de nivel integrado.
ADL	ADL "lateral", es decir, que se coloca a un costado del canal.
ADF	ADF "vertical", es decir, que se coloca en el fondo del canal.
PD	Perfilador acústico móvil basado en el efecto Doppler montado en un barquito. ² Es una técnica de aforo que puede ser útil para calibrar un AD.
VD	Velocímetro acústico portátil basado en el efecto Doppler. ³ Es una técnica de aforo que puede ser útil para calibrar un AD.
Medidor <i>monopath</i>	Aparato fijo que registra la velocidad promedio del agua o un perfil de velocidad a lo largo de un solo corte (horizontal, vertical o inclinado).
Método de aforo	Procedimiento general para determinar el gasto en un canal (por ejemplo, el método "área - velocidad").
Técnica de aforo	Forma particular de aforar, en el marco de un método dado de aforo (por ejemplo, el "vadeo con un molinete pigmeo").
Puente rígido de aforo	Puente especialmente diseñado para aforar con el método "área - velocidad": no tiene pila, es plano, poco alto y perpendicular al eje del canal.
Puente colgante de aforo	Puente colgante especialmente diseñado para aforar, cuando no se puede construir un puente fijo de aforo sobre el canal.

¹ En inglés: *Fixed Acoustic Doppler Current Profiler*

² En inglés: *Moving Acoustic Doppler Current Profiler*

³ En inglés: *Acoustic Doppler Velocimeter*

1.2.2. Terminología relacionada con la calidad de una medición

Tolerancia	Intervalo máximo dentro del cual se acepta un resultado.
Tolerancia nominal (de un medidor)	Tolerancia de un equipo de medición, según su fabricante.
Exactitud ⁴	Intervalo dentro del cual se espera tener el resultado "verdadero" de lo que se esta midiendo, con un nivel de confianza $p = 0.95$. A menos que se especifique lo contrario, una exactitud expresada en porcentaje se refiere a un porcentaje del valor medido.
Sistema de unidades (SI)	Siempre se usará el Sistema Internacional (SI) de unidades para reportar resultados. En particular, se deben expresar las variables hidráulicas con las siguientes unidades: tirante [m], velocidad [m/s] y gasto [m^3/s].
Técnica de referencia para medir el gasto (en condiciones de campo) ⁵	Técnica de aforo que, para un lugar dado, permite determinar el valor del gasto junto -con la incertidumbre sobre este valor- y que se utiliza como referencia para las estimaciones de gasto. En este documento, se acepta como técnica de referencia cualquier técnica de aforo que, según la literatura internacional (a medida de lo posible, una norma ISO), es primaria (es decir, que no requiere de una calibración) y capaz de estimar el gasto en un lugar dado con una incertidumbre mejor que $\pm 6\%$ [$p = 0.95$].
Calibración de un AD	Conjunto de operaciones que consiste en lo siguiente: primero, establecer bajo condiciones específicas la relación entre los valores medidos por el AD y los valores correspondientes de gasto obtenidos con una técnica de referencia; y segundo, utilizar esta relación establecida para estimar el gasto a partir de los valores medidos por el AD.

⁴ En este documento, se utiliza el término "exactitud" como sinónimo del término "incertidumbre expandida".

⁵ Existen varias normas ISO que describen técnicas de aforo primarias, es decir que no requieren de una calibración (por ejemplo, las técnicas basadas en el método de "área - velocidad"); sin embargo, según las mismas normas ISO, no todas estas técnicas permiten estimar el gasto con una incertidumbre de $\pm 6\%$ [$p = 0.95$] (por ejemplo, el aforo con molinete a una sola profundidad).

1.2.3. Forma de reportar y acreditar los resultados de las mediciones

Especificaciones técnicas de un aparato de medición	Siempre debe reportarse la marca, el modelo y el número de serie (si existe) de los aparatos usados. Cuando estos aparatos tienen que ser calibrados, debe entregarse un comprobante de que han sido adecuadamente calibrados.
Literatura técnica (para comprobar la exactitud de una técnica de aforo)	<p>Normas ISO, documentos oficiales publicados por organismos del gobierno (por ejemplo, USGS, CENAM), y eventualmente artículos científicos en revistas.</p> <p>Por lo general, no se aceptara como comprobante las notas técnicas de los fabricantes de instrumentos y tampoco las comunicaciones en congresos (a menos que sean documentos muy claros y muy detallados).</p>
Informe técnico	<p>A menos que se especifique lo contrario, siempre se entregarán los resultados de las mediciones en tres formatos: impresión en papel, archivo ASCII con una síntesis de los resultados (incluyendo una lista completa de las variables usadas, donde se indica su definición y su unidad en el Sistema Internacional) y todos los archivos de datos crudos (con una lista de estos archivos, donde se indica su contenido y con que programa de computo se pueden leer).</p> <p>En cada documento entregado (archivo digital o documento impreso), se indicará el nombre de la persona que elaboró el documento, el nombre de la empresa para la cual trabaja, y la fecha de elaboración</p> <p>Las pastas de cada documento impreso en papel deberán de ser plastificadas. En cada página, se indicará el número de la página y el número total de páginas del documento.</p>
Dibujos	A menos que se especifique lo contrario, siempre se entregarán los dibujos en tres formatos: impresión en papel (resolución mínima 600 dpi, el dibujo debe de ser legible cuando se imprime en blanco y negro), archivo *.jpg, *.tif o *.bmp, y eventualmente el archivo que se utilizo para generar el dibujo (p.e., AutoCad).
Fotografías	A menos que se especifique lo contrario, siempre se entregarán las fotografías en formato *.jpg, *.tif o *.bmp. Deberán tomarse con una cámara digital con resolución mayor a 1 Megapixeles.

1.3. Fundamentos: Necesidad de calibrar un AD

1.3.1. Estimación del gasto con un AD

Por definición, la velocidad media del agua que atraviesa una sección transversal de canal (V , m/s) es igual a:

$$V = Q / A_h \quad (1.1)$$

donde Q (m^3/s) es el gasto que pasa por el canal y A_h (m^2) es el área hidráulica. Si se conociera la velocidad media y el área hidráulica, se podría entonces estimar el gasto de la siguiente manera:

$$Q = A_h V \quad (1.2)$$

Al respecto, se debe aclarar que un AD no mide la velocidad media del agua, sino la componente longitudinal de la velocidad del agua en una cierta porción de canal; comúnmente, esta velocidad se denomina velocidad índice (V_m , m/s). Un AD tampoco mide el área hidráulica, sino el tirante en el canal (y , m) por medio de un sensor de nivel. Por lo anterior, se vuelve necesario calibrar un AD para poder estimar la velocidad media y el área hidráulica. Dicha calibración consiste en establecer una relación entre el tirante medido y el área hidráulica, y otra relación entre la velocidad medida y la velocidad media:

$$A_h = f(y) \quad (1.3)$$

$$V = g(V_m) \quad (1.4)$$

donde y es el tirante (m), V_m es la velocidad medida por el AD (m/s), y f y g son dos funciones (generalmente analíticas). Después de haber calibrado el AD, se puede estimar el gasto de la siguiente manera:

$$Q = f(y) g(V_m) \quad (1.5)$$

1.3.2. Primera calibración: relación entre tirante y área hidráulica

Asumiendo que la geometría del canal no cambia con el tiempo y que el sensor de nivel no se descalibra, se tendrá siempre una relación univoca entre el área hidráulica y el tirante.

- Cuando la forma de la sección del canal es sencilla, se puede calcular teóricamente la relación entre el tirante y el área hidráulica. Por ejemplo:

$$A_h = w_b y \quad \text{canal de sección rectangular} \quad (1.6a)$$

$$A_h = w_b y + s y^2 \quad \text{canal de sección trapezoidal} \quad (1.6b)$$

donde w_b (m) es el ancho en la base del canal y s (m/m) es la pendiente de la pared del canal ($s = 0$ si la pared es vertical).

- Cuando la forma de la sección del canal es más complicada, se pueden utilizar ciertas funciones empíricas para describir analíticamente la relación entre el tirante y el área hidráulica. Por ejemplo:

$$A_h = b_1 y + b_2 y^2 \quad (1.7)$$

donde b_1 y b_2 son coeficientes de ajuste.

- Cuando la geometría del canal es muy irregular, se vuelve necesario determinar la relación entre el tirante y el área hidráulica por medio de una integración numérica, para este caso los equipos de medición AD tienen incorporada la opción de ingresar los valores del ancho de la sección transversal para diferentes tirantes.

1.3.3. Segunda calibración: relación entre velocidad medida y velocidad media

La literatura ⁽⁶⁾ sugiere que los intentos para deducir teóricamente la velocidad media del agua en un canal a partir de la velocidad medida por cualquier aparato instalado en forma *monopath* dentro de un canal, generalmente no dan resultados suficientemente exactos en la práctica (por ejemplo, se tienen problemas cuando el aparato mide la velocidad del agua según un corte horizontal y cuando el tirante varía notablemente en el canal). Ahora bien, la misma literatura sugiere que es factible encontrar empíricamente una relación entre la velocidad medida por el aparato (o velocidad índice) y la velocidad media del agua en el canal.

Por lo anterior, se considera como un requisito siempre calibrar in situ un AD, con el fin de determinar la forma de la relación $V = g(V_m)$. Comúnmente se eligen relaciones empíricas de la siguiente forma:

$$V = a_1 V_m \tag{1.8a}$$

$$V = a_0 + a_1 V_m \tag{1.8b}$$

$$V = a_0 + (a_1 + a_2 y) V_m \tag{1.8c}$$

donde a_0 , a_1 y a_2 son coeficientes de ajuste, y y es el tirante (m).

Sin embargo, cuando la geometría del canal es muy irregular o cuando el comportamiento hidráulico del canal es complejo, puede volverse necesario de elegir otro tipo de relación empírica.

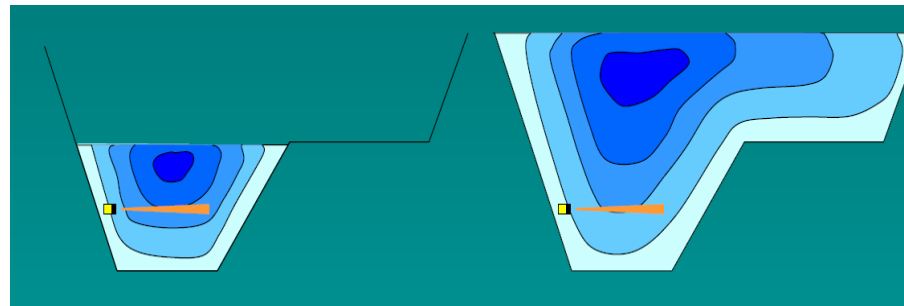


Foto 1.3 En ocasiones, el patrón de velocidad del agua puede tener cambios importantes con relación al tirante y gasto.

⁽⁶⁾ Véase: norma ISO 6416: 2004(E) sobre la instalación tipo *monopath* de los sensores ultrasónicos de tiempo de travesía (incisos [8.1] y [9.2] de la norma); documento ISO/TS 15769: 2000 (E) sobre la instalación tipo *monopath* de los sensores ultrasónicos de tiempo de travesía (incisos [5.3.1] y [8] del documento).

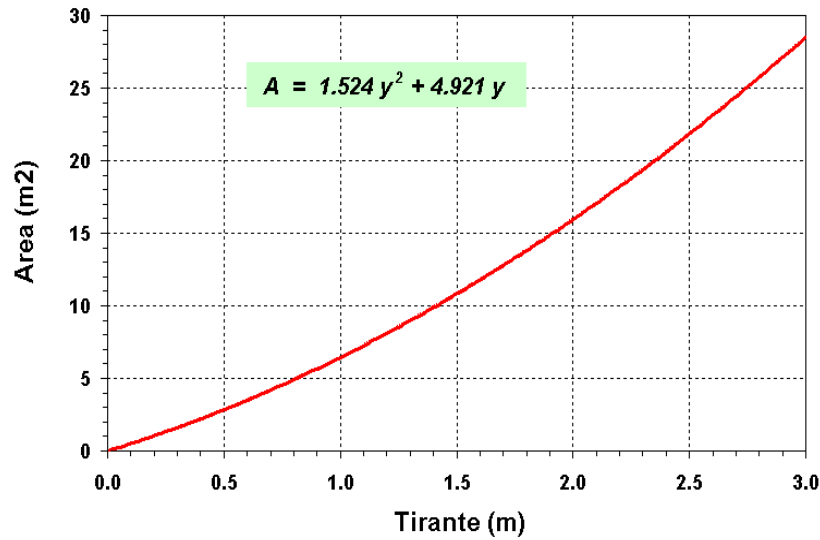


Foto 1.4 Ejemplo de relación "tirante - área hidráulico".

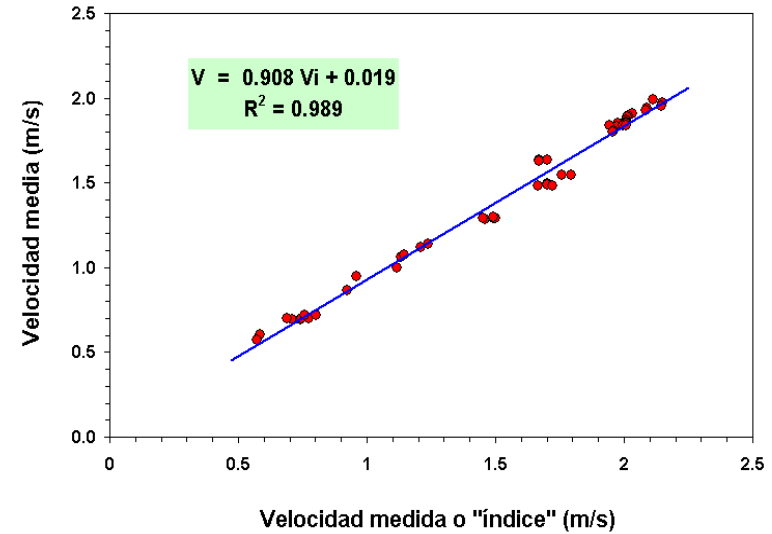


Foto 1.5 Ejemplo de relación "velocidad medida - velocidad media".

1.3.4. Procedimiento general para calibrar un AD

Los pasos a seguir para calibrar un AD se presentan en el Cuadro 1.1. Estos pasos se describen a continuación en este documento.

Cuadro 1.1. Pasos a seguir para calibrar un AD.

1. Elegir tres sitios relacionados con la calibración del AD y su uso
2. Establecer la relación "tirante - área hidráulica"
3. Elegir una técnica de aforo que se usará como referencia
5. Programar el AD en forma definitiva y entregarlo

2. Elegir tres sitios

2.1. Elegir los sitios para el uso del AD y su calibración

2.1.1. Importancia de contar con una forma de calibrar el AD en sitio

La selección de un sitio para colocar un AD depende de varios criterios, como son: las características hidráulicas del canal y el riesgo de vandalismo. Un criterio importante que debe tomarse en cuenta es la necesidad de poder calibrar en sitio el AD y verificar su buen funcionamiento después de esta calibración.

2.1.2. Definir los sitios relacionados con el uso y la calibración de un AD

En forma general, deben distinguirse tres sitios relacionados con la instalación del AD, su calibración y su uso:

- Sitio "A", donde se encuentra el AD.
- Sitio "B", donde el AD estima el gasto en tiempo real.
- Sitio "C", donde se hacen los aforos que sirven de referencia en la calibración del AD.

Nota: Por lo general, el sitio "C" (donde se hacen los aforos de referencia) es idéntico al sitio "B" (donde se estima el gasto).

2.1.3. Requisitos del sitio "A" (donde se encuentra el AD)

Debe elegirse un sitio "A" donde se colocará el AD. Entre otros factores y a medida de lo posible, el sitio "A" debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Tramo de canal con una sección preferentemente bien definida, estable y limpia.

Nota: A medida de lo posible, se recomienda elegir un sitio donde el espesor de la capa de azolve no varía de más de un 2 % del valor del tirante mínimo de operación a lo largo del tiempo: esta situación puede requerir un programa costoso de mantenimiento del canal y por lo contrario, se tendrá que prever un programa intenso de re-calibración del AD (véase inciso [6.3.3]).

- Velocidad del agua entre 0.25 y 6 m/s.
- Tirante entre 0.5 y 6 m (y que, preferentemente, no varía mucho con el tiempo).
- Temperatura del agua que no varía más de ± 5 °C (además, el agua no debe congelarse).
- Salinidad del agua que no varíe más de ± 5 mg/L (además, si el agua es "cristalina", puede ser necesario probar en forma preliminar el buen funcionamiento del AD antes de tomar una decisión de instalación)
- Poco riesgo de vandalismo.

2.1.4. Requisitos del sitio "B" (a la altura del cual el AD estima el gasto)

Debe elegirse un sitio "B" con una escala para poder medir el tirante. El sitio "B" debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- Suficientemente cerca del sitio "A", para poder asumir que el tirante y el gasto son siempre linealmente correlacionados entre "A" y "B".
- La sección del canal a la altura del sitio "B" debe de ser bien definida, regular y limpia (es decir, sin plantas acuáticas, lodo o piedras en la orilla y en el fondo), de tal forma que se puede determinar fácilmente el tirante y el área hidráulica (véase inciso [3]).

2.1.5. Requisitos del sitio "C" (donde se hacen los aforos de referencia)

Finalmente, debe elegirse un sitio "C" donde se harán los aforos de referencia, que se usarán para poder calibrar y verificar el AD. En la práctica, este sitio "C" esta un poco retirado del sitio "A" (donde se tiene el AD), para que los aforos realizados no alteren las condiciones de flujo a altura del sitio "A". Conviene elegir un sitio "C" con un puente fijo de aforo. Por lo general, el sitio "C" (donde se hacen los aforos de referencia) es idéntico al sitio "B" (donde se estima el gasto). El sitio "C" debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- Cumplir con los requisitos que indica la norma ISO para aforar (véase inciso [4]).
- Suficientemente cerca del sitio "B", para poder asumir que el gasto siempre es el mismo entre "B" y "C".
- Los aforos realizados en el sitio "C" no deben alterar las condiciones de flujo a altura del sitio "A".
- Es imprescindible que no existan entradas y salidas de agua entre el punto "A" y "C", si estas existen durante la prueba de calibración se debe verificar que estén cerradas.



Foto 2.1 Sitio "A", donde se instalará el AD.



Foto 2.2 Sitio "B", donde el AD estimará el gasto.

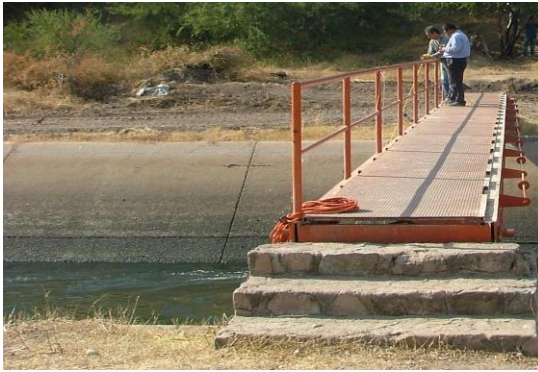


Foto 2.3 Sitio "C", donde se harán los aforos para calibrar el AD.



Foto 2.4. Equipo para marcar los sitios (y levantar la sección del canal en "B").

2.2. Marcar los sitios

2.2.1. Forma general de marcar los sitios

En los tres sitios previamente definidos, deben marcarse puntos de referencia en forma permanente (véase Ilustración 2.1); para este fin, deben utilizarse marcos de concreto, clavos de metal inoxidable y pintura blanca (indicando el nombre de los puntos según la nomenclatura que se presenta a continuación). Se marcarán los sitios preferentemente cuando el canal esta seco (o casi).

Para ubicar los puntos de cada sitio, se utilizará un GPS con una exactitud mejor que ± 5 m; en este caso, se apuntarán siempre las coordenadas de los puntos en el sistema "Latitud/Longitud" y en el sistema UTM "WGS-84". Para ligar topográficamente los puntos entre ellos, se utilizará un equipo de topografía (estación total o nivel infrarrojo); en este caso, se ubicarán los puntos con una exactitud mejor que ± 2 mm.

2.2.2. Marcar el sitio "A"

En el sitio "A" se definirá como un corte transversal al eje del canal, el cual será identificado por dos puntos: punto "AI" (en el margen izquierdo) y punto "AD" (en el margen derecho). Se debe hacer un levantamiento topográfico de la sección transversal ligando los puntos "AI" y "AD". Se debe determinar las coordenadas de latitud y longitud del punto "AI", ya sea mediante una referencia a puntos geodésicos del INEGI o con un sistema GPS.

Luego, se instalará el AD y se definirá a este sitio como el punto de referencia "AM". Se ligará topográficamente el punto "AM" con los puntos "AI" y "AD".

2.2.3. Marcar el sitio "B"

En el sitio "B" se definirá como un corte transversal al eje del canal, el cual será identificado por dos puntos: punto "BI" (en el margen izquierdo) y punto "BD" (en el margen derecho). Se debe hacer un levantamiento topográfico de la sección transversal ligando los puntos "BI" y "BD". Se debe determinar las coordenadas de latitud y longitud del punto "BI", ya sea mediante una referencia a puntos geodésicos del INEGI o con un sistema GPS.

Luego, se definirá un punto de referencia "BT" para las mediciones de tirante (dicho punto puede ser el punto "BI" o el punto "BD"; preferentemente, se encontrará cerca de una escala -en buen estado- que sirve para medir el tirante en le canal). Se ligará topográficamente el punto "BT" con los puntos "BI" y "BD". Se medirá la altura del punto "BT" con respecto al fondo del canal (con exactitud de ± 2 mm). En la medida de lo posible (es decir, si el canal esta seco y si su fondo esta limpio), se dejará una marca para indicar la posición del fondo (punto "BF").

2.2.4. Marcar el sitio "C"

En el sitio "C" se definirá como un corte transversal al eje del canal, el cual será identificado por dos puntos: punto "CI" (en el margen izquierdo) y punto "CD" (en el margen derecho). Se debe hacer un levantamiento topográfico de la sección transversal ligando los puntos "CI" y "CD". Se debe determinar las coordenadas de latitud y longitud del punto "CI", ya sea mediante una referencia a puntos geodésicos del INEGI o con un sistema GPS.

2.3. Documentación por entregarse

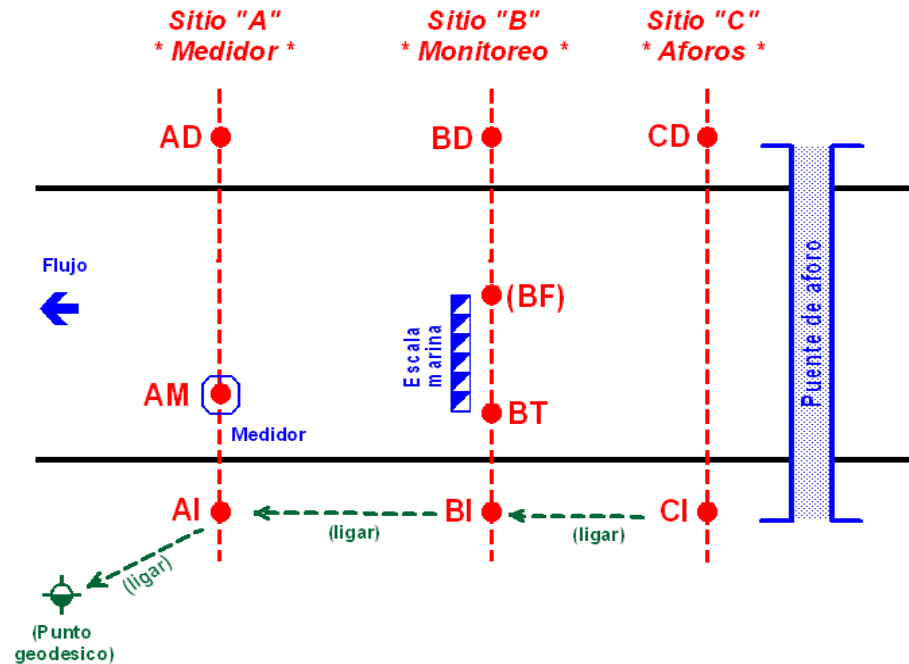


Ilustración 2.1. Ejemplo de ubicación de los tres sitios relacionados con el uso y la calibración de un AD. (los puntos entre paréntesis se marcarán en la medida de lo posible)

Se entregará un informe con un croquis (véase Ilustración 2.1) y un cuadro de datos (véase Cuadro 2.1) sobre la ubicación de los puntos de referencia. En el informe, se justificarán ciertos aspectos y se entregará un anexo fotográfico (véase Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Datos que deben entregarse en el informe

Sobre la selección de los puntos de Referencia

<p>Nombre del proyecto: Municipio: Tramo de canal: Fecha: Responsable de las mediciones: GPS usado (marca, modelo, número de serie): Equipo de topografía usado (marca, modelo, número de serie):</p>			
Sitio	Punto	Dato obligatorio	Dato (a medida de lo posible)
"A" (donde está el AD)	"A1" (margen izquierdo)	Coordenadas "Lat/Lon" Coordenadas "WGS-84"	Posición con respecto a un punto geodésico
	"AD" (margen derecho)	Posición con respecto al punto "A1"	---
	"AM" (sensor de nivel del medidor)	Posición con respecto al punto "A1"	---
"B" (donde se estima el gasto a partir del AD)	"B1" (margen izquierdo)	Coordenadas "Lat/Lon" Coordenadas "WGS-84"	Posición con respecto a un punto geodésico
	"BD" (margen derecho)	Posición con respecto al punto "B1"	---
	"BT" (referencia para el tirante en el canal)	Posición con respecto al punto "B1"	---
"C" (para aforos de referencia)		Altura con respecto al fondo del canal	---
	"BF" (fondo del canal)	---	Posición con respecto al punto "B1"
Aspectos que deben justificarse por escrito	"C1" (margen izquierdo)	Coordenadas "Lat/Lon" Coordenadas "WGS-84"	Posición con respecto a un punto geodésico
	"CD" (margen derecho)	Posición con respecto al punto "B1"	---
			El tirante y el gasto serán siempre linealmente correlacionados entre los sitios "A" y "C".
Fotografías que deben entregarse			La sección del canal debe estar bien definida, regular y limpia a altura de los sitios "B" y "C".
			El gasto siempre es el mismo entre "A" y "C".
			Vista del sitio "A", con la ubicación de los puntos de referencia y del AD.
			Vista del sitio "B", con la ubicación de los puntos de referencia.
			Vista del sitio "C", con la ubicación de los puntos de referencia.
			Vista que permite apreciar la geometría del canal (taludes, y a medida de lo posible, fondo) en el sitio "A".
			Vista que permite apreciar el aspecto del flujo en el sitio "A".
		Vista que permite apreciar la geometría del canal (taludes, y a medida de lo posible, fondo) en el sitio "B".	
		Vista que permite apreciar la geometría del canal (taludes, y a medida de lo posible, fondo) en el sitio "C".	
		Vista que permite apreciar el aspecto del flujo en el sitio "C".	

3. Establecer la relación "tirante - área hidráulica"

3.1. Medir la sección transversal a altura del sitio "B"

3.1.1. Requisitos

Los requisitos para medir el perfil de la sección transversal del canal a altura del sitio "B" son los siguientes (véase Ilustración 3.1):

- Definir el perfil de la sección con por lo menos 13 puntos de medición (2 puntos sobre cada hombro, 3 puntos sobre cada talud, y 3 puntos en la plantilla). El levantamiento topográfico de la sección del canal deberá ser suficientemente detallado como para poder estimar el área hidráulica con una tolerancia de $\pm 1\%$ (para los tirantes de operación).
- Medir las alturas con una tolerancia mejor que $\pm 1\%$ (preferentemente $\pm 0.3\%$) de la profundidad del canal y serán referenciadas al fondo del canal (el cual esta ligado al punto "BT", y eventualmente marcado como punto "BF", véase inciso [2]).
- Medir las distancias horizontales con una tolerancia mejor que $\pm 0.3\%$ del ancho del canal y serán referenciadas al punto "BI" (véase inciso [2]).

3.1.2. Técnicas que pueden usarse

Cualquier técnica que cumple con los requisitos del inciso anterior es aceptable para definir el perfil de la sección del canal. Sin embargo, conviene hacer algunas recomendaciones:

- Lo ideal, es medir el perfil de la sección del canal (en el sitio "B") durante la instalación del AD (en el sitio "A"), porque en este momento el canal esta seco (o casi) y se puede utilizar entonces equipos de topografía muy precisos (por ejemplo, una estación total).
- Como alternativa, se puede medir la profundidad del canal cuando esta lleno con una ecosonda, una varilla (si el tirante es menor a 3 m) o un cable con escandallo (en este caso, se debe de hacer una corrección de ángulo si el cable no es vertical).

Nota: si el ángulo del cable con escandallo es mayor a 30° , las mediciones de profundidad con un cable no se consideraran como confiables.

- No se aceptarán los datos proporcionados por un AD que trabaje con la opción de rastreo de fondo (*Bottom Tracking*), a menos que el contratista entregue especificaciones técnicas muy claras en cuanto a la exactitud de este sistema y que se demuestre que el canal es suficientemente grande y uniforme para poder determinar su sección de esta manera.

3.2. Calcular la relación entre tirante y área

En la práctica, se puede utilizar directamente el software de los AD actuales ⁽⁷⁾ para procesar todos los datos (x_i, y_i) que describen el perfil de una sección transversal de canal (relación de ancho y tirante); con estos datos, el software calcula automáticamente el área hidráulica para cualquier valor de tirante.

Ahora bien, el software de los AD actuales también tiene opciones que permiten aproximar la relación "tirante - área hidráulica" por una función analítica sencilla (por ejemplo, véase las ecuaciones 1.6 y 1.7); en este caso, se acepta describir la relación entre el tirante y el área hidráulica por medio de una función analítica siempre y cuando esto no cambia la estimación del área hidráulica de más de $\pm 0.5 \%$ para cualquier valor del tirante.

3.3. Documentación por entregarse

Se entregará un informe con un croquis (véase Ilustración 3.1) y un cuadro de datos (véase Cuadro 3.1) sobre las coordenadas de los puntos medidos en la sección del canal.

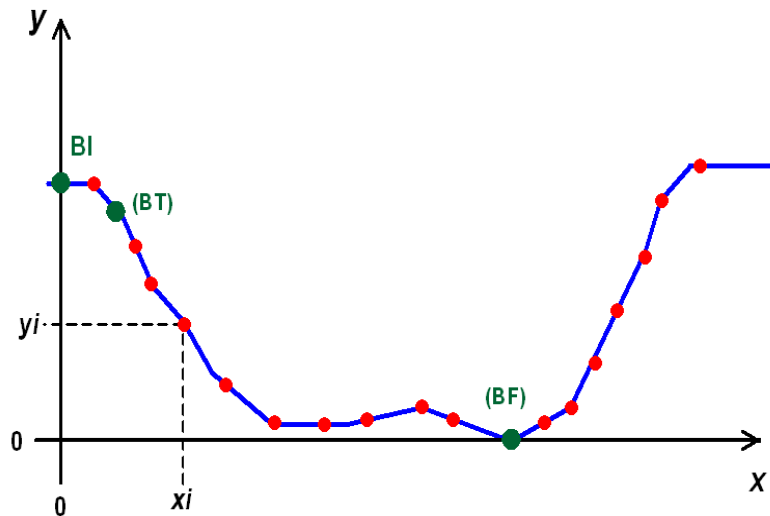


Ilustración 3.1. Sistema de coordenadas para medir el perfil de la sección transversal del canal a altura del sitio "B"

⁽⁷⁾ Documentación técnica de los AD modelo "ChannelMaster" (RDI/Teledyne), "HADFM" (ISCO/Teledyne), "Argonaut SL/SW" (Sontek/Ysi) y "SLD" (OTT).

Cuadro 3.1 Datos que deben entregarse
en el informe sobre la sección del canal a altura del sitio "B".

Nombre del proyecto:
Municipio:
Tramo de canal:

Fecha:
Responsable de las mediciones:

Equipo usado para medir las distancias horizontales (marca, modelo, número de serie):
Tolerancia sobre las mediciones de distancia (m):

Equipo usado para medir las profundidades (marca, modelo, número de serie):
Tolerancia sobre las mediciones de profundidad (m):

Punto	Coordenada x (m) Distancia horizontal con respecto al punto "BI"	Coordenada y (m) Altura con respecto al punto "BF"	Comentario *)
1	0.000	...	punto "BI"
2	
...	
...	
20	

* Por ejemplo: punto "BI", punto "BT", punto "BF", orilla del canal, talud, fondo del canal, presencia de piedras, presencia de sedimentos...

4. Elegir la técnica de aforo que se usará para calibrar un AD

4.1. Consideraciones generales

En la literatura, se describen varios métodos de aforo para canales, de los cuales se pueden mencionar: el método "área - velocidad", el método "tirante - gasto" usando una estructura de aforo portátil, el método basado en la dilución de una sustancia⁸. La selección del método de aforo, de la técnica usada y del sitio donde se aforará debe de hacerse cuidadosamente, tomando en cuenta los siguientes factores:

- Se pretende aforar para calibrar un AD
 - Se debe aforar gastos que son representativos del sitio donde se encuentra el AD.
 - Los aforos realizados no deben alterar las condiciones de flujo a altura del AD.
- Se debe verificar que no haya incompatibilidad entre la técnica de aforo propuesta y las características del canal en el sitio donde se pretende aforar; al respecto, se debe tomar en cuenta las siguientes características del canal:
 - Uniformidad del flujo en el canal
 - Forma del canal
 - Estabilidad del talud y del fondo del canal
 - Presencia de plantas, piedras, lodo en el fondo del canal y en la orilla
 - Calidad del agua en el canal
 - Tirante
 - Velocidad del agua
 - Ancho del canal

⁸ Véase: documento ISO/TR 8363: 1997 (E) sobre la selección de un método para aforar en canales; norma ISO 748: 1997 (E) sobre el método de "área - velocidad"; documento ISO/TS 24154: 2005 (E) sobre el aforo en canales con ADCP móviles.

- Presencia de una estructura que puede usarse para aforar

- Se debe también considerar ciertas características del método de aforo propuesto:
 - Exactitud que puede esperarse
 - Experiencia del proveedor de servicio
 - Tiempo disponible y costo para realizar un aforo

Se puede proponer cualquier técnica de aforo, siempre y cuando se cumple con los siguientes requisitos:

- El proveedor ya tiene experiencia con ella.
- La técnica de aforo propuesta es compatible con el sitio donde se pretende aforar.
- Los aforos realizados no alteran el flujo a altura del AD que se pretende calibrar.
- No hay motivo alguno para sospechar que los gastos aforados a altura del sitio "C" serán distintos (o no linealmente relacionados) de los gastos que pasan a altura del sitio "B".
- Se tienen evidencias en la literatura técnica de que la técnica de aforo propuesta permite estimar el gasto con una exactitud mejor que $\pm 6\%$ [$p = 0.95$].⁽⁹⁾
- La técnica de aforo propuesta permite determinar un gasto en menos de 2 horas (para que la calibración de un AD no tarde más de dos días).

⁽⁹⁾ El criterio de $\pm 6\%$ [$p = 0.95$] que se maneja como requisito en el presente documento es un compromiso entre el tiempo necesario (generalmente menor a 2 horas y la exactitud que se puede alcanzar con los métodos actuales de aforo (según la literatura técnica: ISO/TR 8363: 1997 (E), ISO/TR 7178: 1983 (E)).

4.2. Método "área - velocidad" (con dovelas verticales)

4.2.1. Fundamentos del método "área - velocidad"

En este documento, se da énfasis al método denominado "área - velocidad". De hecho, se trata de un método bastante versátil y de uso común. Además, este método puede usarse para aforar en el sitio donde se desea calibrar un AD; aunque el proveedor de servicio siempre tendrá que comprobar que el uso de este método cumple con los requisitos para determinar el caudal en el sitio elegido. Por último, la literatura técnica ⁽¹⁰⁾ indica que se puede estimar el gasto con una exactitud de $\pm 6\%$ [$p = 0.95$], esta se logra si se aplican los requisitos que se describen a continuación.

Fundamentalmente, el método "área - velocidad" consiste en medir el área y la componente longitudinal de la velocidad del agua en porciones que cubren todo el área hidráulico a lo largo de una sección transversal de canal. El gasto en el canal es la suma de los productos entre estas velocidades y las áreas correspondientes.

La norma ISO 748: 1997 (E) describe varias formas de aplicar el método "área - velocidad" para estimar el gasto en canales. En este caso se usará la condición de estimar el gasto con una suma de gastos parciales estimados en una serie de dovelas verticales, en que se divide la sección transversal del canal. El gasto en cada dovela se estima con la medición de la velocidad media en la vertical multiplicada por su área transversal. Esta metodología es la más usual para aforar en cauces o canales con superficie libre y con equipos de medición puntual de la velocidad con equipos portátiles.

4.2.2. Selección de un sitio para poder aplicar el método

Para poder aforar con el método "área - velocidad", se busca en lo ideal un tramo de canal con las siguientes características:

⁽¹⁰⁾ Véase: norma ISO 748 : 1997 (E).

- Geometría bien definida y medible.
- Canal limpio, es decir sin plantas acuáticas, lodo o piedras en la orilla y en el fondo.
- Tramo de canal recto a lo largo de aproximadamente diez veces el ancho del canal aguas arriba y cinco veces el ancho del canal aguas abajo.
- Líneas de corriente paralelas entre si mismas y paralelas al eje del canal.
- Gasto y tirante que permanecen constantes durante el periodo de aforo.
- Conviene tener un puente fijo de aforo sobre el canal.
- Conviene tener una escala referenciada al fondo del canal para medir el tirante.

Ahora bien, no se debe utilizar el método "área - velocidad" cuando se presentan los siguientes casos:

- Canal con una geometría mal definida: taludes que se derrumban, taludes cubiertos de plantas, canal con muchas plantas acuáticas, canal con mucho lodo o piedras en la orilla o en el fondo.
- Sitio donde las líneas de corriente son muy irregulares: canal con mucha vorticidad (en particular, no es aconsejable aforar aguas abajo de un puente con pilas), flujo en sentido contrario, agua estancada, corriente divergente, corriente convergente, tramo de canal con equipos de bombeo trabajando.
- Sitio donde resulta difícil mantener un gasto y un tirante constante.
- Clima con mucho viento: de hecho, el viento hará que las condiciones de trabajo sean difíciles y que las líneas de corriente en la superficie del canal sean irregulares.

Tal como se verá a continuación (véase inciso [4.3]), existen además requisitos específicos para poder aplicar ciertas técnicas de medición.

Nota: Se asume que la velocidad del agua es nula en las dos orillas del canal, y por lo tanto el gasto que corresponde a las áreas tachadas en gris es nulo. En este caso, conviene aforar lo más cerca posible de las orillas (es decir, minimizar b_1 y b_{m+1}) para poder estimar el gasto total (Q) con la mayor exactitud posible.

4.2.3. Procedimiento general para aplicar el método

El procedimiento general para aplicar el método "área - velocidad" y los requisitos que deben de cumplir las mediciones se presentan en la ilustración 4.1 y en el Cuadro 4.1.

Si se aplican los requisitos mencionados en el Cuadro 4.1 (es decir: por lo menos 20 dovelas, y por lo menos con 3 mediciones de velocidad por dovela), la norma ISO 748: 1997 (E) sugiere que se podrá medir el gasto con una exactitud mejor que $\pm 6\%$ [$p = 0.95$] (véase: Ilustración 4.2).

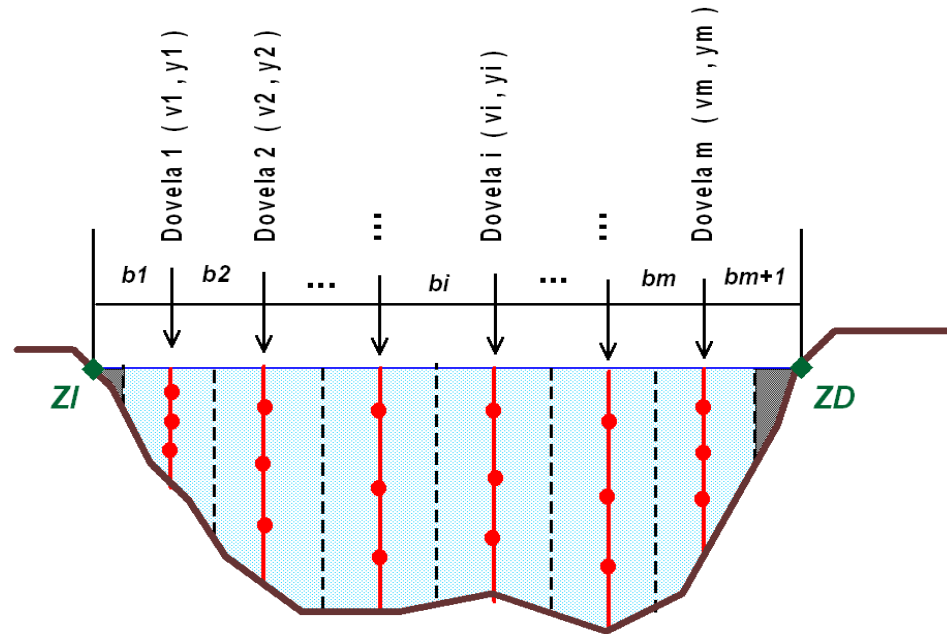


Ilustración 4.1 Esquema para estimar el gasto por integración numérica con el método "mid-section".

Cuadro 4.1 Procedimiento general y requisitos para aplicar el método "área - velocidad".

Paso a seguir		Requisito	Comentario
1	Al inicio del aforo, medir el tirante en el canal	<ul style="list-style-type: none"> Referenciar el tirante con el punto "BT" del sitio "B". Medir el tirante con una exactitud mejor que ± 4 mm. 	
2	Sobre el eje definido por los puntos CI y CD, marcar los dos puntos donde se encuentra el espejo del agua (ZI = margen izquierdo y ZD = margen derecho)	<ul style="list-style-type: none"> Marcar la posición de los puntos ZI y ZD con una exactitud mejor que $\pm 1\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> Conviene ligar los puntos ZI y ZD con los puntos CI y CD.
3	Marcar las dovelas a lo largo del canal	<ul style="list-style-type: none"> Por lo menos 20 dovelas. Marcar la posición de las dovelas con una exactitud mejor que $\pm 1\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> Ubicar la primera y la última dovelas lo más cerca posible de los puntos ZI y ZD.
4	Medir la profundidad del canal en cada dovela	<ul style="list-style-type: none"> Medir la profundidad con una exactitud mejor que $\pm 1\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> Conviene completar los pasos [4] y [5] por cada dovela antes de pasar a la siguiente dovela.
5	Medir la velocidad del agua a altura de cada dovela	<ul style="list-style-type: none"> Por lo menos 3 puntos por dovela (a 0.2, 0.6 y 0.8 veces el tirante). Medir la componente longitudinal de la velocidad del agua con una exactitud mejor que $\pm 2\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> En las dovelas donde no se puede medir la velocidad a 3 profundidades (por ejemplo, en las orillas del canal), se acepta una sola medición de velocidad (a 0.6 veces el tirante).^{(11) (12)}
6	Al final del aforo, medir el tirante en el canal	<ul style="list-style-type: none"> Medir el tirante con una exactitud mejor que ± 4 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> Si el tirante ha cambiado de más de 1 %, se deberá repetir el aforo (ver inciso [5.4])

⁽¹¹⁾ Para la calibración del AD, no se acepta la técnica denominada "de integración" (véase el inicio [7.1.5.4] de la norma ISO 748: 1997), a menos que el proveedor de servicio demuestre que tiene experiencia con ella.

⁽¹²⁾ No se aceptan estimaciones de la velocidad del agua con base a mediciones en la superficie, ni con la condición de medición con un solo punto a 0.6 veces el tirante, excepto lo indicado en el punto 5 de la tabla 4.1.

Componente de la incertidumbre	Símbolo	Valor (%)	Referencia en ISO 748	Escenario considerado
Ancho entre dovelas	$\lambda\%$	1.0	E.2	
Tirante	$\lambda\%$	1.0	E.3	
Tiempo de conteo	$\lambda\%$	7.0	E.4.1	$t = 1 \text{ min. y } v > 0.3 \text{ m/s}$
Núm. puntos por dovela	$\lambda\%$	6.0	E.4.2	$n = 3$
Calibración del molinete	$\lambda\%$	2.0	E.4.3	calib. individual
Núm. dovelas	$\lambda\%$	5.0	E.4.4	$m = 20$
Número de dovelas	m	20		

Contribución a la varianza	valor	%
Ancho	0.1	0.2
Tirante	0.1	0.2
Tiempo conteo	2.5	8.3
Núm. puntos	1.8	6.1
Calibración	0.2	0.7
Núm. dovelas	25.0	84.6
Varianza total =	29.6	100.0

Exactitud teórica (%) =	5.4
--------------------------------	------------

Ilustración 4.2 Exactitud teórica del método "área - velocidad" ($\pm 5.4\%$) según la norma ISO 748 : 1997 (E), cuando se aplican los requisitos indicados en este documento.

4.2.4. Cálculo del gasto

Según la técnica usada para aforar (véase inciso [4.3]), el gasto podrá estimarse a partir de los datos de tirante y velocidad de dos maneras: en forma manual o con un software.

- Cálculo del gasto en forma manual: En forma preliminar, se debe calcular la velocidad promedio del agua por cada dovela; al respecto, se utilizará el promedio aritmético (considerando que los puntos para medir la velocidad del agua sobre un perfil vertical han sido regularmente espaciados):

$$v_i^\bullet = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_i^j \quad (4.1)$$

donde v_i^\bullet (m/s) es la velocidad promedio del agua en la dovela i , j el índice del punto donde se mide la velocidad ($1 \leq j \leq n$), y v_i^j (m/s) la componente longitudinal de la velocidad medida a una cierta altura de la dovela (en este documento, se recomienda medir la velocidad del agua a 0.2, 0.6 y 0.8 veces el tirante). Luego, se debe calcular el gasto; al respecto, se recomienda utilizar el método de integración numérica denominado "mid-section" (véase Ilustración 4.1):

$$Q = \sum_{i=1}^m v_i^\bullet y_i \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \quad (4.2)$$

donde Q (m^3/s) es el gasto, i la dovela considerada ($1 \leq i \leq m$), v_i^\bullet (m/s) la velocidad promedio del agua en la dovela i , y_i (m) el tirante de la dovela i y b_i (m) el ancho entre la dovela i y la dovela $i-1$.

- Cálculo del gasto por medio de un software: Se puede también utilizar un software para calcular el gasto (por ejemplo, el software de los VD y PD actuales). En este caso, se debe verificar que la versión del software ha sido comprobada por organismos oficiales (como es el USGS).

4.3. Técnicas compatibles con el método "área - velocidad"

4.3.1. Presentación general de las técnicas

Se presenta en el Cuadro 4.2 una lista de técnicas basadas en el método "área - velocidad" y que se aceptan para calibrar un AD.

Cuadro 4.2. Técnicas basadas en el método "área - velocidad" y aceptadas para calibrar un AD.

Tipo de medidor ⁽¹³⁾	Medidor usado	Forma de aforar
Medidor no direccional	Molinete "Pigmeo" con varilla	Vadeo o desde un puente fijo
	Molinete grande (tipo "Price AA") con varilla	Vadeo o desde un puente fijo
	Molinete grande (tipo "Price AA") con cuerda y escandallo	Desde un puente fijo (sin pila)
Desde un puente colgante		
Medidor direccional	Medidor electromagnético con varilla	Vadeo o desde un puente fijo
	VD con varilla	Vadeo o desde un puente fijo
	Perfilador de velocidad	PD en modo "estático"
Desde una cuerda tensa		

⁽¹³⁾ En forma general, *no es aconsejable aforar en un sitio donde se ve que las líneas de corriente no son paralelas al eje del canal*. Pero si resulta imposible evitar esta situación, se debe de distinguir dos categorías de medidores.

- **Medidor no direccional:** Son los instrumentos (como son: los molinetes) que miden el *módulo* de la velocidad del agua. En un sitio donde se ve que las líneas de corriente no son paralelas al eje del canal, se vuelve necesario medir *en cada punto* el ángulo entre las líneas de corriente y hacer la siguiente corrección: $v_i^j = u_i^j \cos(\gamma_i^j)$, donde u_i^j (m/s) es la velocidad medida en un punto del canal, γ_i^j el ángulo entre las líneas de corriente y el eje del canal (en el punto de medición), y v_i^j (m/s) la componente longitudinal de la velocidad correspondiente.
- **Medidor direccional:** Son los instrumentos (como son: los VD y los PD) que pueden medir la componente longitudinal de la velocidad del agua. En este caso, no hay *a priori* tantos problemas para aforar (siempre y cuando el eje del canal esta bien identificado).

4.3.3. Algunos requisitos específicos de los medidores que pueden usarse

En los siguientes cuadros, se presentan los requisitos específicos que deben de cumplir ciertas técnicas de común uso y basadas en el método de "área - velocidad":

- Aforo con molinete "Price AA", cable y escandallo (Cuadro 4.3): al respecto, debe mencionarse que no se aceptará un aforo realizado con molinete cuando el ángulo que forma el cable con respecto a la vertical es mayor a 30°. Para velocidades mayores a 1 m/s se debe tener un cable de retención para ajustar la profundidad del molinete; para cada medición de la velocidad se debe entregar los ángulos de deflexión de la cuerda del molinete con respecto a la vertical.
- Aforo con VD (Cuadro 4.4)
- Aforo con PD (Cuadro 4.5): al respecto, debe mencionarse que no se aceptará un aforo realizado con un PD programado en modo "dinámico", porque hasta la fecha, no se tiene una norma que diga cual es la exactitud de esta forma de aforar.

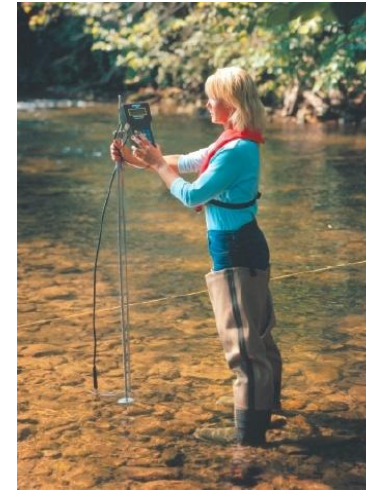
4.4. Documentación por entregarse

Se entregará un informe donde se justificará la selección del método de aforo que se pretende utilizar para calibrar el AD. En particular, se anexaran los siguientes documentos:

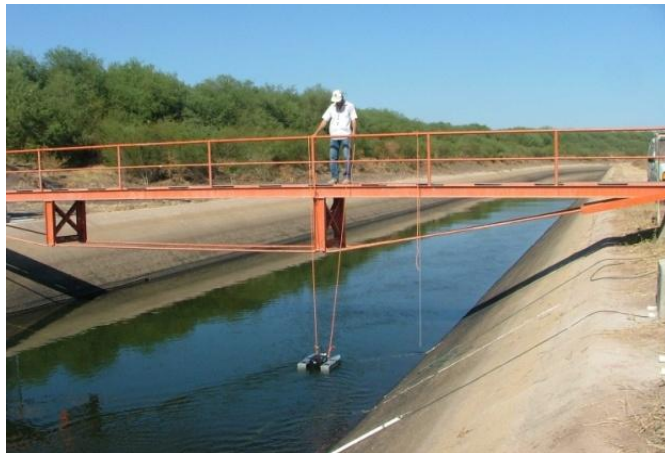
- Acreditación de experiencia del personal que realizara los aforos.
- Ficha técnica de los instrumentos usados para realizar los aforos: marca, modelo, número de serie (cuando existe), acreditación de calidad (tipo ISO 9001 o similar) de su fabricante, certificado reciente de calibración por parte de un organismo acreditado o del gobierno (cuando es necesario).
- Certificado de calibración de los instrumentos usados para realizar los aforos, cuando la literatura internacional (por ejemplo, normas ISO) recomienda que estos instrumentos sean calibrados (por ejemplo, molinetes).
- Referencias bibliográficas que indican que la técnica de aforo propuesta permite estimar el gasto con una exactitud mejor que $\pm 6\%$ [$p = 0.95$].
- Justificación de que la forma de aforar propuesta es compatible con el sitio donde se pretende aforar, de que los aforos realizados no alteraran el flujo a altura del AD que se pretende calibrar, y de que no hay motivo alguno para sospechar que los gastos aforados serán distintos de los gastos que pasan a altura del sitio "B".



(a) Aforo con molinete "Price AA", cable y escandallo (mínimo 3 puntos por dovela, ángulo del cable < 30o)



(b) Aforo con VD



(c) Aforo con PD desde puente de aforo (modo "estacionario")



(d) Aforo con PD desde un cable tenso (modo "estacionario")

Foto 4.1. Técnicas de aforo que pueden usarse para calibrar un AD.

Cuadro 4.3. Aforo con molinete "Price AA" con cable y escandallo

Aparato	Requisitos	
Molinete "Price AA" con cuerda y escandallo	Verificaciones preliminares	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el equipo esta limpio y no ha sufrido golpes, agregar aceite antes de realizar una serie de mediciones, hacer una "prueba de giro".
	Determinación del área hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Para tirantes mayores a 1.6 m. • Se puede utilizar el cable con el escandallo para medir la profundidad del canal (pero si el cable no esta vertical, se debe hacer una corrección de ángulo).
	Mediciones de velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Para velocidades menores a 3 m/s. • La duración de cada medición debe de ser ≥ 60 s. • Conviene medir el tiempo exacto para alcanzar un cierto número de revoluciones. • Si el cable no esta vertical, se debe hacer una corrección de ángulo.
	Cálculo del gasto	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo manual • Si el ángulo del cable del molinete es mayor a 30°, los aforos no se consideraran como confiables.
	Documentación específica por entregarse	<ul style="list-style-type: none"> • Certificado reciente de calibración del aparato (incluyendo. modelo y número de serie del aparato) • Hoja de cálculo con los datos de aforo (incluyendo las correcciones relacionadas con el ángulo del cable).
	Referencias que se pueden consultar	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 2537 : 1988 (E) sobre el uso de molinetes. • ISO 3455 : 2007 (E) sobre la calibración de molinetes. • Herrera Ponce J.C., Peña Peña E. 1999. Instructivo para aforo con molinete (2a edición). Colección Manuales. IMTA, Jiutepec, Mor.

Cuadro 4.4. Aforo con VD

Aparato	Requisitos	
Aforo con VD	Verificaciones preliminares	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el equipo no ha sufrido golpes o corrosión. • Verificar que las baterías del aparato son suficientemente cargadas. • Poner la electrónica del aparato en contacto con la atmósfera una vez al día.
	Determinación del área hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Para tirantes menores a 1.6 m. • Se puede utilizar la varilla del molinete para medir la profundidad del canal.
	Mediciones de velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Para velocidades menores a 1.5 m/s. • Conviene que la "SNR" sea mayor a 10 dB. • La duración de cada medición debe de ser ≥ 60 s. • Siempre mantener la misma orientación del aparato con respecto al eje del canal.
	Calculo del gasto	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo manual o con el software del equipo
	Documentación específica por entregarse	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo y número de serie del aparato • Hoja de cálculo con los datos de aforo.
	Referencias que se pueden consultar	<ul style="list-style-type: none"> • Blanchard S.F. 2004. Policy on the use of the FlowTracker for discharge measurements. USGS OSW Technical Memorandum 2004.04

Cuadro 4.5. Aforo con PD en modo "estacionario".

Aparato	Requisitos	
PD en modo "estacionario"	Verificaciones preliminares	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que el equipo no ha sufrido golpes o corrosión. • Verificar que las baterías del aparato son suficientemente cargadas. • Medir la salinidad del agua en el canal con un conductivímetro adecuado (tolerancia ± 5 mg/L). • Si hay una brújula (o <i>compass</i>) integrada, ajustarla en sitio una vez al día. • Determinar el ángulo (azimuth) entre el eje del canal y la brújula del aparato. • Programar adecuadamente el aparato, según las recomendaciones del fabricante. • Conviene aforar desde un puente fijo (sin pilas sobre el canal).
	Determinación del área hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Marcar manualmente los dos puntos en la orilla del canal donde se encuentra el espejo del agua. • Marcar manualmente los dos puntos donde el aparato empieza a medir la velocidad del agua en 2 celdas. • Marcar manualmente por lo menos 20 dovelas sobre el puente (tolerancia mejor que $\pm 1\%$). • Por cada dovela, medir la posición del fondo del canal en forma automática (con la ecosonda del aparato).
	Mediciones de velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Por cada dovela, medir el perfil de velocidad en el canal en forma automática (junto con la posición del fondo del canal). • En cada dovela, se esperará por lo menos 60 s para registrar un perfil de velocidad.
	Cálculo del gasto	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo con el software del equipo
	Documentación específica por entregarse	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo y número de serie del aparato • Hoja de cálculo con una síntesis de los datos de aforo. • Todos los archivos de configuración y de datos crudos del aparato (indicando con cual software se pueden leer)
	Referencias que se pueden consultar	<ul style="list-style-type: none"> • Documentación técnica de los fabricantes sobre el modo "estacionario".

5. Establecer la relación "velocidad medida - velocidad media"

5.1. Preparar la caracterización

En forma preliminar, el contratista debe acordar con el personal de la CONAGUA para poder iniciar las actividades:

- El proveedor se compromete en calibrar el AD en no más de 3 días y el usuario se compromete en hacer lo necesario para que el proveedor pueda realizar sus actividades.
- Se considera que es factible calibrar el AD en no más de 2 días. Sin embargo, es una buena precaución prever un tercer día, en caso de que resulte imposible concluir el trabajo programado en menos tiempo, o que sea necesario verificar ciertos datos de la calibración.
- La calibración del AD se hará a partir de mediciones obtenidas para un mínimo de 6 condiciones de flujo distintas.
- Se acordará de una forma de generar gastos que cubren lo más que se pueda el rango de valores esperados a altura del sitio donde se instaló el AD (por ejemplo, gasto "pequeño", "mediano" y "alto").
- En la medida de lo posible, se buscará también una forma de generar tirantes que cubren lo más que se pueda el rango de valores esperados (por ejemplo, tirante "pequeño" y "alto").

Antes de iniciar la determinación de la relación "velocidad medida - velocidad media", debe prepararse el AD para que pueda adquirir datos adecuadamente:

- Inspeccionar el equipo en seco
- Medir la salinidad del agua (o "concentración equivalente", con una tolerancia de ± 2 g/L)
- Ajustar el reloj del AD a una referencia (tolerancia ± 60 s)
- Llenar el canal de tal forma que el AD empieza a funcionar
- Verificar el buen funcionamiento del AD (por ejemplo, verificar que no hay anomalía en la señal de los "beams")
- Definir la configuración básica del AD (salinidad del agua, número y tamaño de celdas, duración de una medición, etc.).
- No olvidar que el AD debe configurarse para poder estimar el tirante a altura del sitio "B" (es decir, el sitio donde se pretende evaluar el gasto).
- Empezar a adquirir datos con el AD.

Enseguida, debe prepararse el equipo de aforo que se usará como referencia a altura del sitio "C":

- Ajustar el reloj que se usará durante los aforos (reloj del aforador o reloj integrado a un equipo) a una referencia (tolerancia ± 60 s).
- Verificar que el equipo que se usará para aforar esta listo para funcionar.

5.2. Realizar una serie de aforos

La secuencia para realizar un aforo con el fin de calibrar un AD es la siguiente:

1. Llenar el canal para un cierto gasto y un cierto tirante, y esperar el equilibrio.
2. Apuntar la velocidad medida por el AD en el sitio "A" (V_m)
3. Medir el tirante a altura del sitio "B" con una exactitud mejor que ± 4 mm.
4. Calcular el área hidráulica (A_h) a altura del sitio "B" (véase inciso [3]).
5. Apuntar la hora de inicio del aforo
6. Medir el gasto (Q_{ref}) a altura del sitio "C" (véase inciso [4]).
7. Apuntar la hora de fin del aforo
8. Apuntar de nuevo la velocidad medida por el AD en el sitio "A" (V_m).
Si la velocidad ha cambiado de más de 3 %, se debe repetir el aforo.
9. Medir de nuevo el tirante a altura del sitio "B" con una exactitud mejor que ± 4 mm.
Si el tirante ha cambiado de más de 1 %, se debe repetir el aforo.
10. Con base al aforo realizado, calcular el gasto a altura del sitio "C" (Q_{ref}) y el área hidráulica a altura del sitio "B" (A_h).
11. Deducir la velocidad media a altura del sitio "B": $V_{ref} = Q_{ref} / A_h$.

Si no hay mayor problema, se debe repetir la secuencia para realizar por lo menos 6 aforos (cambiando el gasto y/o el tirante a cada vez).

5.3. Calcular la relación entre velocidades

La secuencia para determinar la relación "velocidad medida - velocidad media" es la siguiente:

1. Se recuperaran los datos adquiridos por el AD durante la calibración y se pondrán por separado los datos de velocidad medidos durante cada aforo.
2. Luego, se buscará una relación analítica entre la velocidad medida (V_m) y la velocidad media (V_{ref}), tal que se tiene una buena correlación entre ambas: si el tirante en el canal varia poco, se recomienda utilizar la ecuación [1.8b], mientras que si el tirante en el canal varia mucho, poco, se recomienda utilizar la ecuación [1.8c]. Por lo menos, se espera tener un coeficiente de correlación lineal (r^2) mayor a 0.85.

5.4. Documentación por entregarse

Se entregará un informe con los datos que se presentan en el Cuadro 5.1

Cuadro 5.1. Datos que deben entregarse en el informe sobre la campaña de aforo.

Nombre del proyecto: Municipio: Tramo de canal:	
Información básica	<ul style="list-style-type: none"> • Fechas y horas • Personas que han participado en el aforo • Forma de aforar (véase inciso [4]) • Mediciones de salinidad y de temperatura del agua en el canal • Por lo menos una fotografía de los aforos realizados
Gastos aforados	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones de tirante realizadas en el sitio "B" • Estimaciones del área hidráulica realizadas en el sitio "B" • Mediciones de gasto realizadas en el sitio "C"
Configuración del AD durante la calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo digital (por ejemplo, ASCII, Word o Excel) con una lista completa y clara de los parámetros de configuración del AD, junto con su unidad y su valor. • Archivo de configuración compatible con el software del AD.
Datos crudos medidos por el AD	<ul style="list-style-type: none"> • Archivo digital con la fecha y las velocidades medidas en cada celda por el AD. • Archivo de datos compatible con el software del AD.
Datos procesados a partir de las mediciones con el AD	<ul style="list-style-type: none"> • Informe que explica como se definió la "velocidad medida" por el AD (es decir, cuales celdas sirven para obtener esta velocidad). • Archivo digital con las velocidades medidas por el AD durante la calibración.
Relación "velocidad medida - velocidad media"	<ul style="list-style-type: none"> • Informe que explica cual función analítica se eligió para describir la relación experimental "velocidad medida - velocidad media". • Archivo digital con el valor de los parámetros de la función analítica ajustada, y con los residuos (es decir, las diferencias entre los valores experimentales y estimados de las "velocidades medias").

6. Programar el AD y entregarlo

6.1. Programar el AD en forma definitiva

Después de haber calibrado el AD tal como se indica en este informe, el contratista deberá entrar los parámetros de configuración en el aparato (definición de la "velocidad medida por el AD", relaciones "tirante - área hidráulico" y "velocidad medida - velocidad media"), sin cambiar su configuración básica (es decir, el número y tamaño de celdas, la configuración del sensor de nivel, etc.).

Si lo desea, el contratista podrá incrementar la duración de las mediciones, siempre y cuando el AD proporciona un valor de gasto cada 15 min.. Luego, el proveedor dejará el AD trabajando en modo automático.

6.2. Entregar el AD calibrado

6.2.1. Entrega y recepción del AD

El contratista deberá entregar el AD funcionando adecuadamente y calibrado según el procedimiento indicado en este documento.

Por su parte, el usuario se compromete en nunca manipular, mover o quitar el AD. Si tiene motivos para dudar del buen funcionamiento del AD, tendrá que solicitar la asesoría de proveedor de servicio.

6.2.2. Entrega de un informe final sobre el proceso de calibración

El proveedor de servicio entregará un informe final sobre la calibración del AD con los siguientes rubros:

- Selección de los sitios - Véase inciso [2.3]
- Relación "tirante - área hidráulico" - Véase inciso [3.3]
- Selección de la técnica de aforo de referencia - Véase inciso [4.4]
- Relación "velocidad medida - velocidad media" - Véase inciso [5.5]
- Configuración definitiva del AD: Archivo digital (por ejemplo, ASCII, Word o Excel) con una lista completa y clara de todos los parámetros de configuración, con su unidad y su valor; Archivo de configuración compatible con el software del AD.
- Garantía sobre la calibración - Véase inciso [6.3]

6.3. Garantía sobre la calibración de un AD

6.3.1. Condiciones de garantía

Es importante aclarar que un AD puede descalibrarse desde el momento que uno intenta moverlo. Por lo anterior, se aplicarán las siguientes condiciones de garantía con respecto a la calibración de un AD en caso de que sea necesario revisarlo:

- Si el sello de garantía colocado por el contratista sobre el AD (véase inciso [1.2]) está intacto y si el contratista decide quitar el equipo para revisarlo y volver a colocarlo, entonces tendrá que verificar la calibración del aparato (véase inciso [6.2]) a su cargo.
- Si el sello de garantía ha sido roto, el contratista podrá solicitar que se verifique la calibración del aparato a cargo del usuario (incluyendo si hubo vandalismo)

6.3.2 Procedimiento para verificar la calibración de un AD

Si por algún motivo, se mueve o se decide quitar y volver a colocar el AD después de haberlo calibrado (por ejemplo, para repararlo), se tendrá que verificar la calibración del aparato de la siguiente manera:

1. Para dos gastos nuevos (por ejemplo, "pequeño" y "grande"), comparar el gasto estimado por el AD (Q_m) con el gasto medido con una de las técnicas de referencia que se describen en este documento (Q_{ref}).
2. Se aceptará no cambiar la calibración del AD si resulta que los dos gastos nuevos son estimados con una tolerancia de $\pm 9\%$ (es decir, $|Q_m - Q_{ref}|/Q_{ref} \leq 0.09$).⁽¹⁴⁾
3. Por lo contrario, se tendrá que volver a calibrar el AD tal como se indica en este documento (obviamente, en este caso se aprovechará la información obtenida con los dos gastos nuevos)

6.3.3. Alcances de la calibración de un AD

Se debe reconocer que la calibración de un AD puede dejar de ser válida si la geometría del canal cambia con el tiempo (esto no es un motivo para descalificar al proveedor de servicio).

Es aconsejable prever un calendario de verificaciones periódicas del equipo. Se recomienda verificar la calibración de un AD de vez en cuando (por ejemplo, una o dos veces al año).

⁽¹⁴⁾ Si la exactitud de la técnica para calibrar el AD es de 6% [$p = 0.95$] y si la exactitud del AD "calibrado" es de 7% [$p = 0.95$] (véase **Anexo [DL o DF]**), la diferencia entre las dos técnicas puede entonces ser de hasta: $(6^2 + 7^2)^{0.5} \approx 9\%$ [$p = 0.95$].

Si por algún motivo, se decide cambiar el AD por otro (sin importar que sea de la misma marca y del mismo modelo), se tendrá que calibrar el nuevo aparato tal como se indica en este documento.

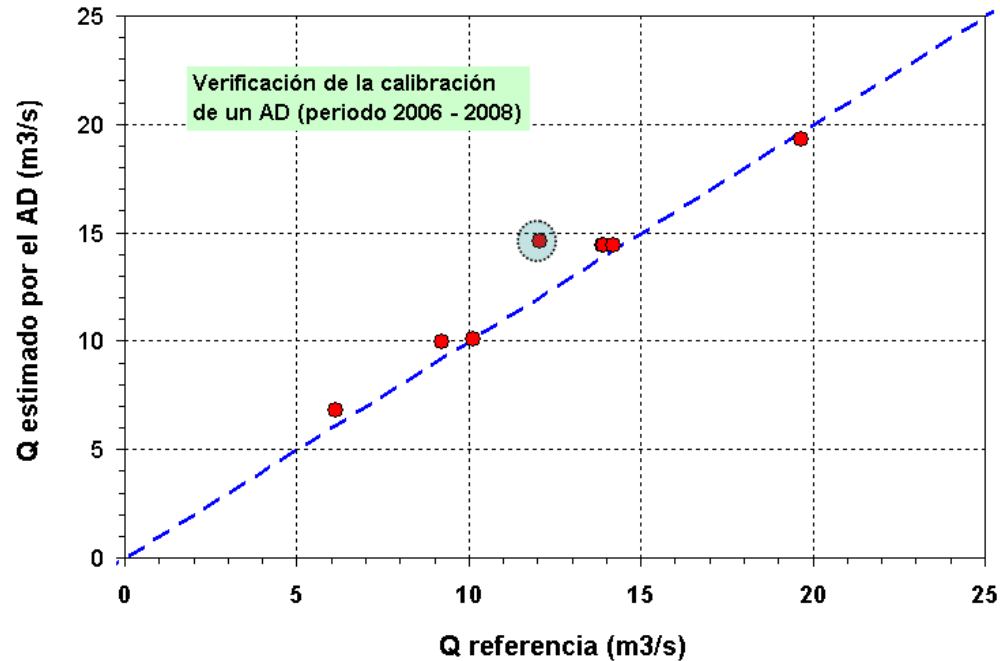


Foto 6.1. Verificación de un AD a lo largo de dos años de funcionamiento.

Nota: se obtuvo una diferencia mayor a 9 % en un solo caso (ver punto rodeado de un círculo); sin embargo, el aforo de "referencia" realizado al momento de obtener esta diferencia no se hizo con una de las técnicas recomendadas en este documento. Por lo tanto, solo se recomendó seguir verificando el AD de vez en cuando, sin necesidad de volver a calibrarlo todavía.

7. Conclusión

Los AD (Aforadores con medidor de velocidad Doppler) pueden ser útiles para medir el gasto en sitios que difícilmente pueden instrumentarse con otras técnicas más tradicionales (como son: los Aforadores de Garganta Larga y los Aforadores de Tiempo de Travesía). Pero en este caso, debe calibrarse el AD.

En la actualidad, todavía no existe una norma internacional (por ejemplo, de la ISO) sobre como llevar a cabo la calibración de un AD. Además, no se puede decir con toda certeza cuantos puntos son necesarios para llevar a cabo dicha calibración.

Por lo anterior, calibrar adecuadamente un AD no es una tarea sencilla. Es una operación que puede ser costosa, y esto debería tomarse en cuenta cuando se propone instrumentar un canal con un sistema AD. Además, puede ser necesario verificar la calibración de un AD, en inclusive repetirla de vez en cuando:

- Cuando la geometría de un canal cambia bastante (problemas de azolve o de malezas acuáticas).
- Si se mueve un AD (en particular, cuando se quita y se vuelve a colocar) o si se reemplaza por otro equipo (inclusive del mismo modelo).