

MANUAL PARA LA REALIZACIÓN DE AFOROS DE CAUDAL EN FUENTES SUPERFICIALES DE AGUA.

GUÍA PARA EL MONITOREO HIDRÁULICO MEDIANTE EL LEVANTAMIENTO DE SECCIONES VOLUMÉTRICAS, MEDICIONES DE VELOCIDAD Y ESTIMACIONES DE VALORES DE CAUDAL, EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES.



**Subdirección Ambiental
Área Metropolitana del Valle de Aburrá**

Medellín, 2019

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	5
1. METODOLOGÍA	6
1.1 Materiales y equipos	6
<input type="checkbox"/> OTT MF PRO:	6
<input type="checkbox"/> Correntómetros:.....	7
<input type="checkbox"/> Sensor de velocidad Stalker Acoustic Doppler Current Profiler (ATS II): .	7
<input type="checkbox"/> Elementos complementarios:.....	8
1.2 Características de la sección de aforo	8
<input type="checkbox"/> Sección estable:	8
<input type="checkbox"/> Condiciones de flujo:	9
<input type="checkbox"/> Accesibilidad:	9
1.3. Tipo de aforos	9
<input type="checkbox"/> Aforo por vadeo:	10
<input type="checkbox"/> Aforo por suspensión:	10
2. Método para calcular el caudal	11
2.1. Estrategia de trabajo	13
2.2 Administración y manejo de datos	14
2.3. Método para calcular los caudales horarios	14
3. REFERENCIAS.....	15

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Elementos complementarios para la realización de aforos líquidos en campo.	8
------------------------------------------------------------------------------------------	---

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. OTT MF PRO.	6
Figura 2. Correntómetro OTT C-31.	7
Figura 3. Stalker ATS II.	8
Figura 4. Aforo por vadeo.	10
Figura 5. Aforo por suspensión.	11
Figura 6. Método Velocidad-Área: Discretización de las verticales en la sección transversal y su perfil de velocidad media.	12
Figura 7. Toma de datos con correntómetro y sensor de velocidad superficial.	13

INTRODUCCIÓN

Los aforos de caudal consisten en determinar la cantidad de agua que atraviesa una sección transversal de un cuerpo de agua en un instante de tiempo dado. Este valor permite, entre otros aspectos, conocer la disponibilidad hídrica del cuerpo de agua y constituye un dato útil para la estimación de las cargas contaminantes que transporta la corriente, sus tiempos de viaje, la calibración de los modelos hidráulicos e hidrológicos e, incluso, la prevención de desastres para zonas localizadas aguas abajo de la sección de aforo.

Para realizar un aforo, se debe efectuar el levantamiento de la sección transversal para el punto donde serán medidas las velocidades de agua, con el fin de obtener, por medio de una relación matemática simple (velocidad por área) el valor de caudal de agua; que resultará en unidades volumétricas por unidades de tiempo.

Este procedimiento implica las acciones coordinadas de un equipo de técnicos capacitados para efectuar dicha labor, puesto que uno de ellos debe ingresar al cuerpo de agua para efectuar la respectiva toma de niveles y longitudes de la sección transversal, y las velocidades verticales y horizontales en esta. Esta información es un insumo fundamental para los análisis de calidad y cantidad del agua, por lo que los sitios donde son efectuados deben coincidir con los puntos correspondientes a la red de monitoreo para la toma de muestras de agua y análisis fisicoquímicos.

En este documento se presenta las generalidades de la metodología seguida para la realización de aforos de caudal por sección transversal, en cuerpos de agua superficiales; propuesta por el SIATA para el desarrollo del proyecto RedRío del AMVA.

1. METODOLOGÍA

El aforo líquido es un procedimiento técnico que consiste en tomar mediciones sobre cauce que permitan calcular el caudal del mismo. En la presente sección se desarrolla una metodología que comprende el inventario de los equipos y materiales utilizados, las características que debe cumplir la sección de aforo, el tipo de aforo, el método para el cálculo del caudal y la logística o estrategia de trabajo empleada. Esto con el fin de estandarizar el proceso, agilizar los aforos y minimizar la incertidumbre que se puede presentar durante la toma de datos.

1.1 Materiales y equipos

Antes de realizar la campaña se debe verificar que los equipos y materiales estén en buenas condiciones. Los principales elementos que se utilizan para medir velocidad del flujo son los siguientes:

- **OTT MF PRO:**

El OTT MF pro (Figura 1), es un medidor de caudal magnético-inductivo de fácil manejo y mantenimiento reducido, apto para la medición en cauces naturales y descubiertos; según las normas internacionales USGS/ISO. Sus mediciones son fiables en aguas de velocidad baja, en condiciones de turbulencia y cauces con mucha vegetación; y en corrientes con alta concentración de sedimentos en suspensión. El rango de medición de velocidad es de 0 a 6 m/s y la precisión asociada es de $\pm 2\%$, cuando se encuentra entre 0 y 3 m/s, y $\pm 4\%$ cuando se encuentra entre 3 y 5 m/s.



Figura 1. OTT MF PRO.

- **Correntómetros:**

El OTT C-31 (Figura 2), es un instrumento mecánico que por medio de un molinete mide la velocidad del agua. Este es apto para mediciones en cualquier tipo de cauce. El margen de error asociado a los datos que obtiene es de $\pm 2\%$.



Figura 2. Correntómetro OTT C-31.

- **Sensor de velocidad Stalker Acoustic Doppler Current Profiler (ATS II):**

El sensor Stalker ATS II (Figura 3), es un radar de pistola que utiliza el principio del efecto Doppler para medir la velocidad de flujo, enviando un pulso de sonido para medir la frecuencia de retorno recibida. Esto es posible gracias al choque de las ondas del sonido emitido contra las partículas de sedimentos suspendidos presentes en el agua, por lo que este dispositivo suele ser apto para ser empleado en corrientes de alta carga en suspensión que permitan una medición más precisa, o en corrientes con una lámina de agua baja donde no sea posible emplear el correntómetro.

La precisión del instrumento es de dígito entero, redondeando al entero más cercano y, en décimas de resolución, a la décima más cercana.



Figura 3. Stalker ATS II.

- **Elementos complementarios:**

En los monitoreos hidráulicos o aforos de caudal líquido, además de los instrumentos descritos anteriormente, suele ser necesario emplear otros utensilios y elementos para efectuar dicha labor. Entre los más empleados se encuentran los relacionados en la Tabla 1, a continuación.

Tabla 1. Elementos complementarios para la realización de aforos líquidos en campo.

Equipo	Elemento
Topografía	Mira
	Regla
	Aerosol
	Chazos
	Cuerdas
	Flexómetros
	Cintas de demarcación
Seguridad e higiene	Guantes de látex
	Alcohol
	Gel antibacterial
	Agua
	Tapa bocas
	Pañuelos desechables
	Traje impermeable (fontanero)
	Botas pantaneras
	Arnés
	Línea de vida
	Escalera de mano
	Taladro inalámbrico
Toma de datos	Computador-Libreta
	GPS
	Cámara fotográfica

1.2 Características de la sección de aforo

La ubicación de la sección de aforo se determina de acuerdo con las características de la corriente y debe cumplir con algunos requisitos listados a continuación:

- **Sección estable:**

La sección escogida para efectuar la determinación del caudal mediante aforo líquido, debe ubicarse en un tramo recto, lo más homogéneo posible, con el fin de garantizar la distribución adecuada de las velocidades verticales en cada punto y la estimación de caudal para la sección.

Debe presentar una altura de lámina suficiente para permitir el uso de los instrumentos (correntómetros) y presentar un lecho que permita la medición y el desplazamiento del encargado, evitando obstrucciones o barreras.

- **Condiciones de flujo:**

Debe presentar un régimen de flujo uniforme y permanente, sin vórtices o zonas muertas que puedan generar reversiones en el flujo y alterar las mediciones de velocidad.

Igualmente, debe encontrarse alejada de estructuras hidráulicas, bombos o vertimientos que puedan afectar las mediciones de velocidad o las estimaciones de caudal, así como evitar pendientes del lecho pronunciadas o escalones.

- **Accesibilidad:**

La sección debe presentar opciones de acceso para que el técnico encargado de efectuar las mediciones pueda ingresar al cuerpo de agua, de manera segura. Debe contar con los implementos de seguridad relacionados en la tabla anterior.

La selección de la sección de aforo parece un asunto trivial, sin embargo, encontrar una sección hidráulica apropiada, en cauces naturales, no es una tarea fácil. Esto se debe a la dinámica fluvial de los cuerpos hídricos, tanto ríos como quebradas, que los hace un sistema variable tanto en tiempo como en espacio. Para el caso de cauces intervenidos o canalizados, considerando que el sitio de aforo debe coincidir con el del monitoreo de calidad, el inconveniente resultante es que estos no siempre se realizan en tramos rectos y homogéneos, de flujo uniforme o de fácil acceso; tal y como lo requiere el análisis hidráulico. En estos puntos, por lo general y dado el objetivo o enfoque del monitoreo de calidad, suele presentarse la acumulación de sedimentos y residuos que modifican constantemente la sección transversal del cauce, o situándose cerca de descargas y vertimientos, alterando el volumen y la velocidad.

Por tanto, la primera tarea en que incurre el equipo de aforo al llegar al cuerpo de agua es determinar si la sección escogida por el equipo RedRío para el monitoreo de calidad es apropiada hidráulicamente. Si no lo es, se debe escoger otra sobre el mismo tramo hidrológico. Para ello es clave escoger una con el régimen hidrológico más parecido a la inicial, es decir, que la cantidad de agua transportada no se altere en medidas relevantes, que no existan descargas de aguas residuales u otros afluentes. Esto debido a que la cantidad de agua del tramo es, en efecto, el interés del equipo RedRío.

1.3. Tipo de aforos

Según el tipo de corriente existen diferentes tipos de aforos. En lo que a aforos se refiere, el tipo de corriente depende exclusivamente de la altura de la lámina de agua y de las velocidades superficiales. Para garantizar la seguridad del personal técnico, solo se puede ingresar al cauce cuando las profundidades son menores a

60 cm, y las velocidades superficiales del flujo no superan 1 m/s. A continuación se describen los tipos de aforo utilizados durante las campañas y sus limitaciones:

- **Aforo por vadeo:**

Este método permite realizar la medición de velocidades y obtener la geometría de la sección. Se emplea para corrientes de profundidad menor a 60 cm, con fondo fijo y resistente. Además el flujo debe presentar velocidades superficiales menores a 1 m/s, que permita el ingreso de los técnicos y de los equipos sin generar riesgos para los mismos. Para este tipo de aforos, es necesario ingresar al cuerpo de agua teniendo un eje de referencia en la abscisa, y una cuerda que marque las verticales, sobre las cuales se realizarán las mediciones. En la Figura 4 se muestra un esquema que presenta la manera en que se realiza este tipo de aforo.

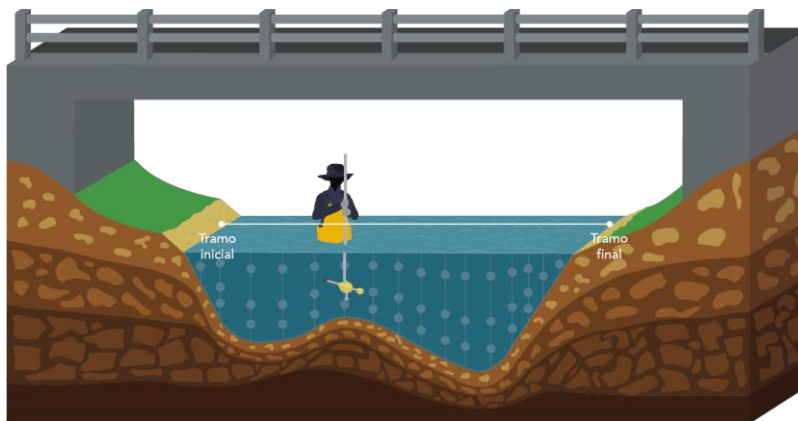


Figura 4. Aforo por vadeo.

- **Aforo por suspensión:**

Con este método se realiza la medición de velocidades y se obtiene la geometría de la sección, sin ingresar a la corriente. Esto se logra dotando el equipo de un lastre (peso muerto) que permita aforar la sección desde puntos elevados, tales como puentes. Para las mediciones de velocidad, se hace uso del correntómetro C31. Este método es utilizado para las secciones sobre el río Aburrá debido a la dificultad para acceder a las fuertes corrientes que se presentan. En la Figura 5 se muestra un esquema de la forma de medición.

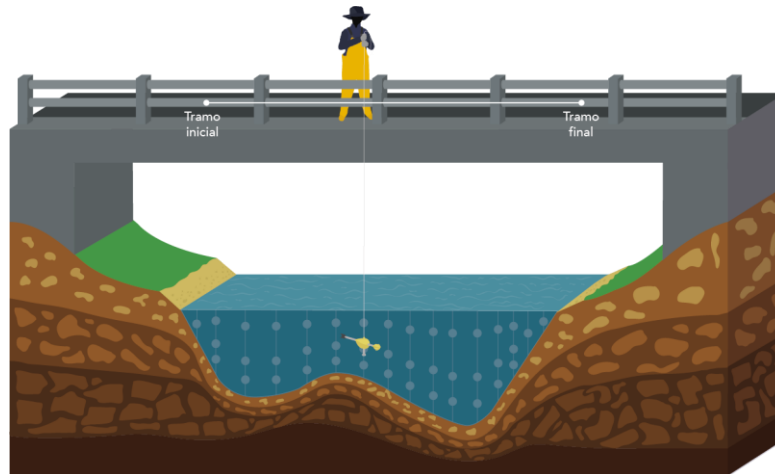


Figura 5. Aforo por suspensión.

2. Método para calcular el caudal

Para el cálculo del caudal se emplea el método de “Área-velocidad”. Se debe determinar un eje de referencia en la orilla del cuerpo de agua. Luego, se divide el cauce en (m) número de verticales o subsecciones, tal que se garantice que en ninguna transite más del 10% del caudal total que transporta el cauce. Luego se establece la distribución de las abscisas de tal forma que cubran el canal de una manera uniforme y equidistante; por ejemplo, si la sección tiene un ancho superficial de 10 metros, se deben disponer las cintas con una distancia inferior a un metro. Un mayor número de subsecciones representa menor incertidumbre en el resultado final de los cálculos.

En cada vertical (j), donde ($1 \leq j \leq m$), se mide la distancia al eje inicial u orilla y i , la velocidad media V_i , la altura de la columna de agua D_i y se registran los datos. La velocidad se mide usando alguno de los equipos ya mencionados y la profundidad con una regla limnimétrica, esto último en caso de no usar el OTT-MF PRO que la mide automáticamente. El caudal se calcula sumando las descargas parciales Q_i sobre las N subsecciones i (Ecuación 1).

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i = \sum_{i=1}^N A_i V_i = \sum_{i=1}^N B_i D_i V_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde A_i es el área y B_i el ancho de la subsección i respectivamente (Le Coz et al., 2012). La discretización de la sección transversal con las verticales, secciones y subsecciones; se puede observar en la Figura 6. En la Figura 7 se presenta una foto donde se muestra el procedimiento en campo.

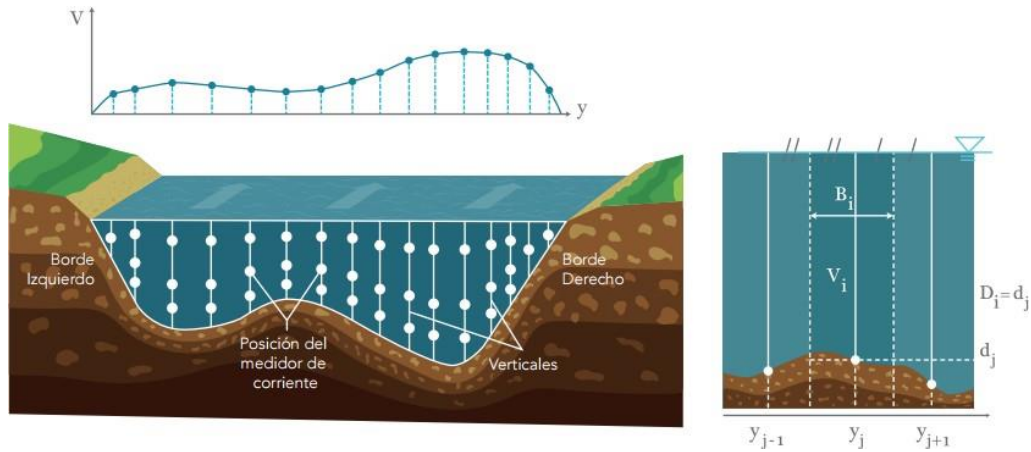


Figura 6. Método Velocidad-Área: Discretización de las verticales en la sección transversal y su perfil de velocidad media.

Durante la temporada de lluvias, se realizan aforos directamente en el flujo es imposible debido a las grandes velocidades y profundidades que se desarrollan en el cauce, la disponibilidad de sensores de velocidad superficial supone un avance en esta dirección. Cada sensor registra la velocidad de la lámina superficial de agua sobre un punto específico de la sección, sin limitaciones relacionadas con niveles altos en el canal ya que no hay contacto directo, haciendo posible la estimación del caudal en un número de casos mayor al obtenido mediante aforos, y permite tener estimaciones durante crecientes.



Figura 7. Toma de datos con correntómetro y sensor de velocidad superficial.

El caudal es estimado mediante relaciones entre la V_{sup} (velocidad superficial) y la V_{med} (velocidad media de la sección). La estimación del caudal a partir de V_{sup} se realiza mediante la ecuación 2, en donde A corresponde al área de la sección transversal según el nivel de la lámina de agua y F_v es el factor de relación entre V_{med}/V_{sup} .

$$Q = F_v \cdot V_{sup} \cdot A \quad (\text{Ecuación 2})$$

El valor de F_v reduce la magnitud de V_{sup} de manera que sea similar a V_{med} , sin embargo, este valor tiende a variar entre secciones. Estas variaciones parecen estar asociadas a características de la geometría hidráulica de cada sección. Según (Costa. et al.), numerosas observaciones y medidas, muestran que en canales naturales, la velocidad del flujo se incrementa en la vertical con el logaritmo de la distancia tomado desde el fondo del canal, la velocidad cambia rápidamente cerca de la capa límite del fondo, y más lentamente hacia el centro del flujo, como resultado del comportamiento logarítmico, la velocidad media de cada vertical se ubica aproximadamente a 60% de la altura de la lámina de agua. Debido al avance en la recolección de velocidades superficiales con sensores que no tienen contacto con el agua, y asumiendo que el perfil de velocidades tiene un comportamiento logarítmico, la velocidad superficial se transforma a la velocidad media del canal mediante un factor que se encuentra entre 0.8 y 0.9.

2.1. Estrategia de trabajo

Para cada día de campaña establecido por el equipo RedRío se establecen dos comisiones, una para la zona sur y otra para la zona norte del Valle de Aburrá. Esto, con el fin de optimizar la elaboración de los aforos. Al llegar a la corriente se escoge la sección a aforar y se define el tipo de aforo a realizar. Si el tipo es por

vadeo, se ensambla el correntómetro asegurando que la hélice gire apropiadamente y que esté correctamente lubricada, las personas que vayan a ingresar al cauce deben utilizar traje impermeable, guantes de látex y tapabocas. Si el tipo de aforo es por suspensión, se ensambla el correntómetro acoplándole un lastre para ingresarlo a la corriente, en caso de ser necesario, el personal debe usar arnés. Finalmente, se toman las medidas y las observaciones pertinentes del aforo y el cauce, y se toma un registro fotográfico que evidencie las características más importantes de la sección de aforo.

2.2 Administración y manejo de datos

Los datos obtenidos de los diferentes dispositivos de medida, se apuntan en una libreta de campo o se digitan directamente en un computador portátil, donde se les realiza un pre proceso, garantizando que las medidas sean consistentes con lo que se observa en el cauce. Se recomienda graficar el levantamiento topográfico in-situ con el software diseñado por el SIATA, para observar cómo se va generando la sección y corregir posibles errores. Es muy importante anotar la fecha, hora de inicio y fin del aforo y hacer una descripción detallada del sitio, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, esto en orden de alimentar el procesamiento de datos en la oficina. Una vez terminado el aforo se suben los datos al servidor del SIATA.

2.3. Método para calcular los caudales horarios

Los datos de altura de la lámina de agua que son tomados en la sección transversal cada hora por el equipo RedRío, son procesados para obtener los caudales durante toda la jornada, desde las 6:00 h. hasta las 18:00 h. Para el cálculo se toma la altura de la lámina de agua en la hora del aforo y con el caudal estimado mediante el aforo líquido, se calculan el resto de caudales horarios de manera proporcional. Se asume que la velocidad media es la misma que la del aforo, al igual que los demás parámetros hidráulicos fijos en cada estación. Por esta razón es clave que la sección elegida para aforar mantenga el mismo régimen hidrológico durante todo el día.

3. REFERENCIAS

Jhon Costa., Spicer Kurt R., Cheng Ralph T., Haeni F. Peter, Melcher Nick B., Thurman E. Michael, Plant William J., and Keller William C. Measuring stream discharge by non- contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 27(4): 553–556. DOI: 10.1029/1999GL006087.

J Le Coz, B Camenen, X Peyrard, and G Dramais. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow measurement and Instrumentation*, 26: 18–29, 2012.