

COMPARACIÓN ENTRE AFORO POR MOLINETE Y AFORO POR TRAZADOR PARA LA MEDICIÓN DEL CAUDAL EN UNA CORRIENTE PEQUEÑA

Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

RESUMEN. Este artículo muestra la medición de caudal para un tramo de río por medio de dos métodos diferentes, el método del molinete y el método de dilución. Primero se muestra la base teórica de los métodos utilizados, para el caso del aforo por molinete, éste mide la velocidad de la corriente en una vertical a diferentes profundidades para establecer la velocidad media, teniendo como base la curva de distribución de velocidades en un canal, luego de esto el caudal puede ser determinado multiplicando la velocidad media por el área de influencia de cada vertical, la sumatoria de productos es el caudal total circulante. En el caso del método de dilución, su fundamento es la variación de la concentración del trazador en la corriente en el tiempo, desde el principio de la inyección hasta el final, la concentración puede llegar a un valor constante, en el caso de la inyección continua, o llegar a un valor máximo y decaer, en el caso de la inyección puntual. Luego se tabulan los resultados para el aforo por molinete y el aforo por trazador y se analizan las ventajas y desventajas de los dos.

PALABRAS CLAVE: correntómetro, trazador, hidrometría.

ABSTRACT. *This article shows the streamflow measurement for a reach section by two different methods, the current meter method and the dilution method. In first place the theory for the methods is showed, in the current meter case, it measures the current's velocity at different depths for establish the mean velocity value, having the velocity distribution curve in a channel as fundament, after this the flow value can be determinated multiplying the mean velocity with the influence area for each vertical, the total of products is the circulant flow. In the dilution method case, its fundament is the variation of the tracer's concentration in a current in time, from the beginning to the end, the concentración can catch up a constant value, in case of continue injection, or catch up a maximum value and decay, in case of puntual injection. After that the results are tabulated for the current meter method and tracer injection method and the advantages and disadvantages are analyzed.*

KEY WORDS: *current meter, tracer, hydrometry.*

INTRODUCCIÓN.

En el campo de la hidrología, la medición del caudal circulante en una corriente es una de las principales variables que deben conocerse. En algunos de los casos, la determinación del caudal por métodos convencionales es difícil debido a las condiciones de la corriente, por tal motivo es necesario emplear métodos alternativos, sin embargo al utilizar dichos métodos, puede quedar en duda si los resultados provistos son fiables. Por tal motivo se llevaron a cabo las presentes pruebas.

METODOLOGÍA.

Investigación bibliográfica para conocer los principios que rigen los tipos de aforo puestos a prueba, para luego llevar a cabo el procedimiento de medición en campo. Para el caso de aforo por molinete, se establecieron tres secciones de río a aforarse, dos secciones aguas arriba (AR1 y AR2 respectivamente) y una sección aguas abajo (AA) a 20 y 19 metros respectivamente de las secciones aguas arriba, cada sección se dividió en diez segmentos de igual longitud, teniéndose en total once verticales contando las márgenes, para cada vertical se llevaron a cabo mediciones de número de revoluciones y tiempos a seis diferentes profundidades para obtener la

velocidad de corriente en cada punto, un punto cerca de la superficie, uno a 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 de la profundidad y otro cercano al lecho de manera que pudieran obtenerse las curvas de distribución de velocidades. Posteriormente por medio de los métodos de puntos reducidos propuestos en el manual 168 de la OMM se determinó el caudal medio circulante para cada sección. Los caudales obtenidos con el método del molinete fueron la base contra la que se compararon los caudales obtenidos con el uso de trazadores. Para el uso de trazadores, se evaluaron la inyección constante y la inyección puntual de un volumen de agua con una concentración de trazador, en este caso sal, mucho mayor a la contenida de forma natural en la corriente. Luego con los datos de concentración en la corriente antes, durante y después de la inyección se determinó el caudal circulante. La inyección se llevó a cabo en un punto en el que la mezcla de la solución se viera favorecida por la abundancia de rocas y la turbulencia que provocan las mismas y a una distancia tal, que la mezcla de la solución fuera completa en la corriente (longitud de mezcla).

RESULTADOS.

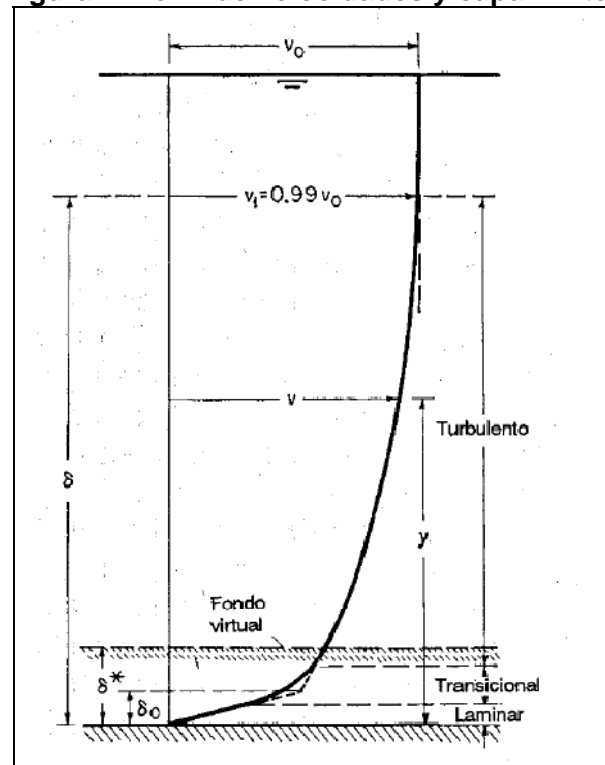
La verificación de la efectividad del uso de la sal como trazador para la medición del caudal en una corriente.

Revisión de la metodología para el uso de la sal como trazador y su efectividad para medir el caudal en corrientes que presenten irregularidades y en las cuales el molinete no puede ser empleado debido a pendientes elevadas o turbulencia.

CAPA LÍMITE

Como la capa límite no puede distinguirse, su espesor ha sido definido arbitrariamente en varias formas. Una definición comúnmente utilizada es que su espesor es la magnitud de la distancia normal desde la superficie del contorno para la cual la velocidad " V_1 " es igual al 99% de la velocidad límite " V_0 " hacia la cual la curva de distribución de velocidades en la capa límite se aproxima asintóticamente.

Figura 1. Perfil de velocidades y capa límite.



Fuente: Chow, Ven Te; Hidráulica de canales abiertos

El efecto de la capa límite sobre el flujo es equivalente a desplazar imaginariamente hacia arriba el fondo del canal, hasta una posición virtual, en una cantidad igual al llamado espesor de desplazamiento, δ^* , (figura 1), el cual se determina de la siguiente forma:

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{V}{V_1}\right) dy$$

Donde:

V = velocidad superficial a una distancia " y " desde la superficie del canal

V_1 = velocidad en el borde de la capa límite

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN FLUJO TURBULENTO

La distribución de velocidades en un flujo uniforme en canales se vuelve estable cuando la capa límite turbulenta se encuentra completamente desarrollada. En la capa límite turbulenta puede demostrarse que la

distribución es casi logarítmica. En la capa viscosa cercana a la pared o subcapa laminar, el esfuerzo cortante en el fluido es esencialmente constante e igual al esfuerzo cortante en la pared “ τ_0 ”. La distribución de velocidad está relacionada con el esfuerzo cortante y la viscosidad absoluta dentro de la región “ $\delta' > y$ ” mediante la ley de viscosidad de Newton:

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{u}{y} = \nu \cdot \frac{u}{y}$$

Donde:

$y \leq \delta'$
 $\delta' = \delta^*$ = espesor de la subcapa laminar
 $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_* = V_f$, velocidad de fricción o cortante

Por lo tanto:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u \cdot y}{\nu}$$

Muestra una relación lineal entre “u” y “y” en la película laminar. Éste se extiende hasta un valor de “ $y \cdot u_* \approx 5$ ”, es decir:

$$\delta' = 5 \cdot \frac{\nu}{u_*}$$

En la capa de traslape se supone que el esfuerzo cortante es aproximadamente igual al esfuerzo cortante en la pared (figura 6), pero la turbulencia domina y el esfuerzo cortante viscoso no es importante. Por consiguiente se tiene la ecuación:

$$\tau = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

Debido a que “L” tiene dimensiones de longitud, y basados en consideraciones dimensionales, debería ser proporcional a “y” (la única dimensión lineal importante), se supone “ $L = ky$ ”. Por sustitución se tiene:

$$\frac{du}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dy}{y}$$

Y la integración da como resultado:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln(y) + \text{constante}$$

Debe notarse que al sustituir el valor de “u” en la ecuación, también se determina “L” como proporcional a “y” (“ d^2u/dy^2 ” es negativo, debido a que el gradiente de velocidad disminuye a medida que “y” crece).

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD

De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), la sección transversal del canal se divide en franjas verticales por medio de un determinado número de verticales sucesivas y las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 60% de la profundidad en cada vertical. O tomando el promedio de las velocidades a 20% y 80% cuando se requieren resultados más confiables. El origen de la medición de la velocidad a 20, 60 y 80% de la profundidad se basa esencialmente en la distribución teórica de velocidades en un canal abierto. Para condiciones de flujo turbulento sobre una superficie rugosa, la curva de distribución de velocidades tiene una forma aproximada a una parábola. Cuando la profundidad y velocidad se incrementan, sin embargo, la curva se aproxima a una línea vertical en su posición límite. En un canal abierto con una profundidad “d”, siendo esta una superficie libre, para encontrar el punto en el cual la velocidad puntual es igual a la velocidad media se tiene la ecuación:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$$

Donde:

y_0 = factor de integración derivado de la condición que está muy cerca del fondo rugoso del canal donde “ $y = y_0$ ”.

Como resultado “ $u = 0$ ”. La velocidad media se determina por:

$$\bar{V} = \frac{1}{d - y_0} \cdot \int_{y_0}^d \left[\frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \right] dy$$

O con “ $y_0 \ll 1$ ”, como:

$$\bar{V} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{d}{y_0}\right) - \frac{u_*}{k}$$

Igualando “ $u = \bar{V}$ ”, la profundidad a la cual la velocidad puntual a la velocidad media es:

$$\ln\left(\frac{y}{y_0}\right) = \ln\left(\frac{d}{y_0}\right) - 1$$

$$y = 0.3679 \cdot d \cong 0.4 \cdot d$$

Existen sin embargo otras aproximaciones de la curva de distribución de velocidades. Cuya ecuación es la siguiente:

$$V = \left(\frac{D - h}{a}\right)^{1/c}$$

Donde:

V = velocidad a la altura “ h ” bajo la superficie del agua

c = coeficiente usualmente de valor 6

D = profundidad de flujo total

a = constante numéricamente igual a la distancia por encima del fondo del canal de un punto en el que la velocidad tiene un valor unitario

La integración de dicha aproximación conduce a valores en los cuales “ h ” o la profundidad o profundidades en los cuales al tomarse el dato de velocidad puntual se tiene un valor aproximado a la velocidad media. Es por ello que durante las pruebas se decidió tomar los datos a profundidades de 20, 40, 60 y 80% de la profundidad total.

LONGITUD DE MEZCLA

En la ecuación:

$$\tau = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante

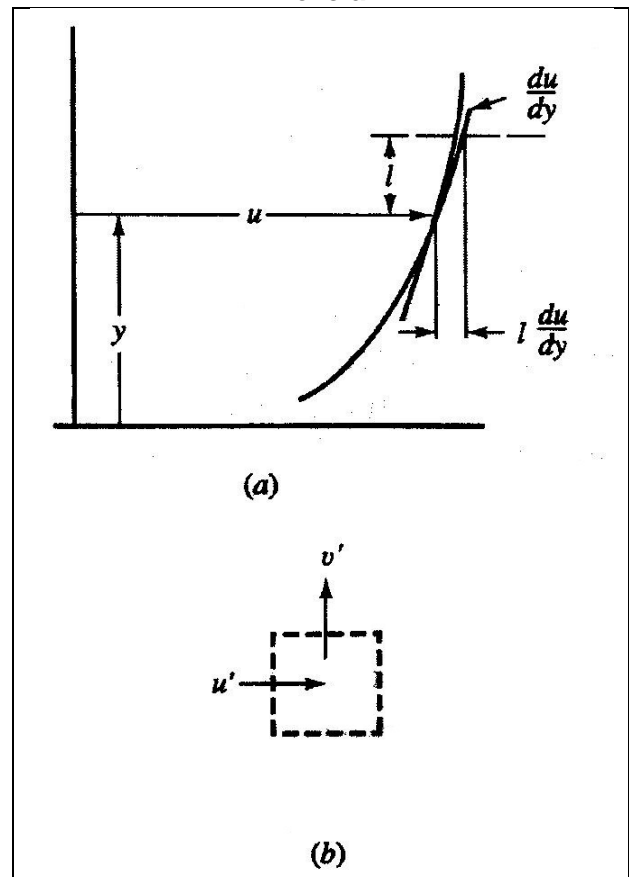
u = velocidad a profundidad “ y ”

ρ = densidad del agua

y = altura de medición de la velocidad

L = longitud característica, conocido también como longitud de mezcla de Prandtl.

Figura 2. Notación para la longitud de mezcla.



Fuente: Streeter, Victor L. Mecánica de fluidos.

En la teoría de Prandtl se obtienen expresiones para u' y v' en términos de una distancia de longitud de mezcla “ L ” y del gradiente de

velocidad “du/dy”, en la cual “u” es la velocidad media temporal en un punto y “y” es la distancia perpendicular a “u”, usualmente medida desde la frontera. En un gas una molécula, antes de chocar con otra, vuela a una distancia promedio conocida como la trayectoria libre media del gas. Utilizando esto como una analogía (figura 2a). Prandtl supuso que una partícula de fluido se desplaza una distancia “L” antes de que su momentum sea cambiado por el nuevo ambiente. Utilizando la ecuación de continuidad, el dedujo que debe haber correlación entre u’ y v’ (figura 2b), de tal manera que “v” sea proporcional a “u”.

$$v' \sim u' = du/dy$$

Sustituyendo para u’ y v’ y dejando que “L” absorba el coeficiente de proporcionalidad, la ecuación que define la longitud para mezcla se obtiene como:

$$\tau_{xyt} = \tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \rho L^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

La relación particular de “L” con la distancia a la pared “y”; no está dada por la deducción de Prandtl. Von Kármán sugirió, después de considerar relaciones de similitud en flujo turbulento, que:

$$L = k \cdot \frac{du/dy}{du^2/dy^2}$$

Donde:

k = es una constante universal en flujo turbulento, sin importar la configuración de la frontera o el valor del número de Reynolds. El coeficiente de Von Kármán, k, tiene un valor de 0.4.

PRUEBAS LLEVADAS A CABO

Las pruebas fueron llevadas a cabo en la estación hidrométrica de la Finca Sabana Grande, ubicada en el departamento de Escuintla, con coordenadas 90°49’55” Oeste, 14°21’55” Norte. En el río Cantil.

Aforo con molinete: para el aforo con molinete se obtuvieron las diferentes curvas de velocidad para las secciones analizadas, para cada sección se tomaron dos series de datos, para la sección AR1 los datos AR1.1 y AR1.2, para la sección AR2, los datos AR2.1 y AR2.2, para la sección AA, los datos AA.1 y AA.2. Luego de ello, se determinó la velocidad media (V_m) por medio de los métodos de puntos reducidos y sus diferentes ecuaciones.

Para un punto:

$$V_m = V_{0.6}$$

Para dos puntos:

$$V_m = 0.5 \cdot (V_{0.2} + V_{0.8})$$

Para tres puntos:

$$\bar{V} = 0.25 \cdot (V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.6} + V_{0.8})$$

Para cinco puntos:

$$\bar{V} = 0.10 \cdot (V_{\text{superficie}} + 3 \cdot V_{0.2} + 3 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{\text{lecho}})$$

Para seis puntos:

$$\bar{V} = 0.10 \cdot (V_{\text{superficie}} + 2 \cdot V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.4} + 2 \cdot V_{0.6} + 2 \cdot V_{0.8} + V_{\text{lecho}})$$

El caudal medio se obtuvo entonces para cada método de determinación de la velocidad media, cuyos resultados fueron promediados de tal forma que se obtuviera un valor de caudal para cada sección, la tabla 1 muestra los resultados de caudal obtenidos.

Tabla 1.

Sección	Caudal (m ³ /s)
AR1.1	1.1579
AR1.2	1.1647
AR2.1	1.0359
AR2.2	1.0301
AA.1	1.0890
AA.2	1.0831
Q_{prom(molinete)}	1.0940

Fuente: elaboración propia.

Aforo por trazadores o por dilución: se llevaron a cabo cinco inyecciones continuas y cinco inyecciones puntuales, teniéndose el punto de toma de datos de concentraciones finales a una distancia de aproximadamente 45 metros del punto de inyección (longitud de mezcla) de la solución con trazador (sal común). Para la longitud de mezcla, al no tenerse la cantidad de datos necesarios, se empleó la ecuación empírica:

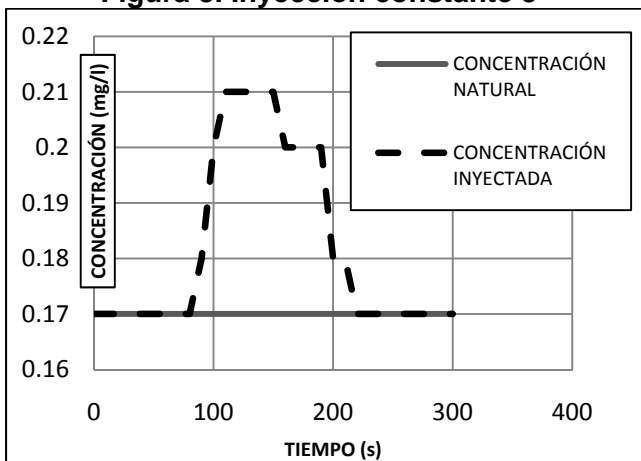
$$L = b \cdot Q^{1/3}$$

Donde:

L = longitud de muestreo (en metros)
 $Q \approx 1 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal aproximado de la corriente)
 b = (14 para inyección en el centro y 60 para inyección desde la banca) para este caso se tomó el valor de 50 por tratarse de una inyección a una distancia aproximada a $\frac{1}{4}$ del ancho del cauce.

$$L = 50 \text{ metros}$$

Figura 3. Inyección constante 3



Fuente: elaboración propia.

Debido a la alta turbulencia presentada en el punto de inyección, las concentraciones se tomaron datos de concentraciones finales a 45 metros del punto de inyección. Para el caso de la inyección constante, se inyectó un caudal continuo de solución y se tomaron tiempos hasta que la variación de la concentración de sal en el punto de muestreo llegara a valores

continuos o casi continuos. La figura 3 muestra la gráfica de concentración contra tiempo para la inyección constante número 3. La concentración natural del río (C_0) era del orden de 0.17 mg/l mientras que la de la solución inyectada (C_1) era de 139.70 mg/l, inyectada a un caudal de 0.000312 m^3/s (q), teniéndose una solución aguas abajo (C_2) del orden de 0.20 a 0.21 mg/l durante un periodo de tiempo. El caudal para inyección constante se determinó de la siguiente forma:

$$Q_1 = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

La tabla 2, muestra los caudales obtenidos por inyección constante.

Tabla 2. Caudales por inyección constante.

	Caudal (m^3/s)
Inyección 1	1.6714
Inyección 2	1.0397
Inyección 3	1.2435
Inyección 4	1.8788
Inyección 5	1.4599
$Q_{\text{prom(iny. cont)}}$	1.4586

Fuente: elaboración propia.

Para cada inyección continua se varió la concentración C_1 y el caudal inyectado.

En la inyección puntual, el caudal de salida de la solución era variable, es por ello que el caudal está en función del volumen total de solución inyectado y el tiempo de tránsito del trazador, tiempo denotado como "T", cuyo valor puede ser visto en la gráfica de concentración contra tiempo. Debido a que la corriente ya contaba con la presencia del trazador, la ecuación utilizada para la determinación del caudal fue la siguiente:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\int_0^T C dt - C_0 \cdot T}$$

Donde:

V = volumen de la solución inyectada

C_0 = concentración inicial o concentración natural de la corriente

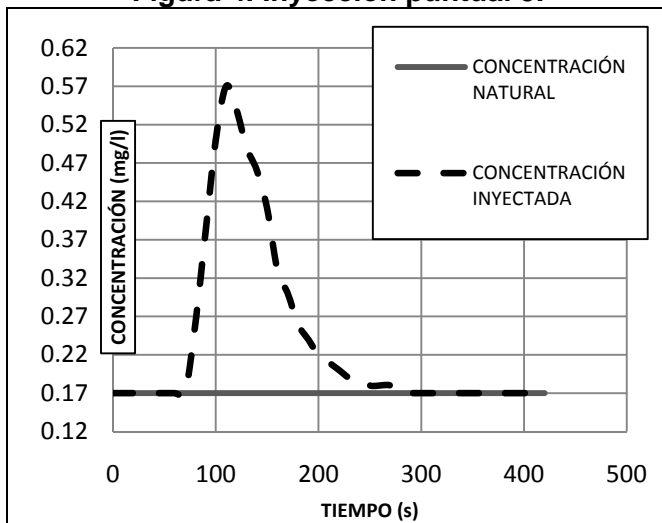
C_1 = concentración de la solución inyectada

$\int_0^T C dt - C_0 \cdot T = C_3$ = concentración de trazador por unidad de tiempo = área entre la curva de la solución inyectada y la horizontal que representa la concentración natural.

T = tiempo total que tarda la solución en cruzar el punto de muestreo

La curva de concentración contra tiempo alcanza un valor máximo y luego decrece rápidamente (figura 4). La tabla 3 muestra los valores de caudales obtenidos por inyección puntual.

Figura 4. Inyección puntual 5.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Caudales por inyección puntual.

	Caudal (m^3/s)
Inyección 1	1.1276
Inyección 2	0.7973
Inyección 3	3.4684
Inyección 4	3.6916
Inyección 5	1.1215
$Q_{prom(iny. punt.)}$	2.0413

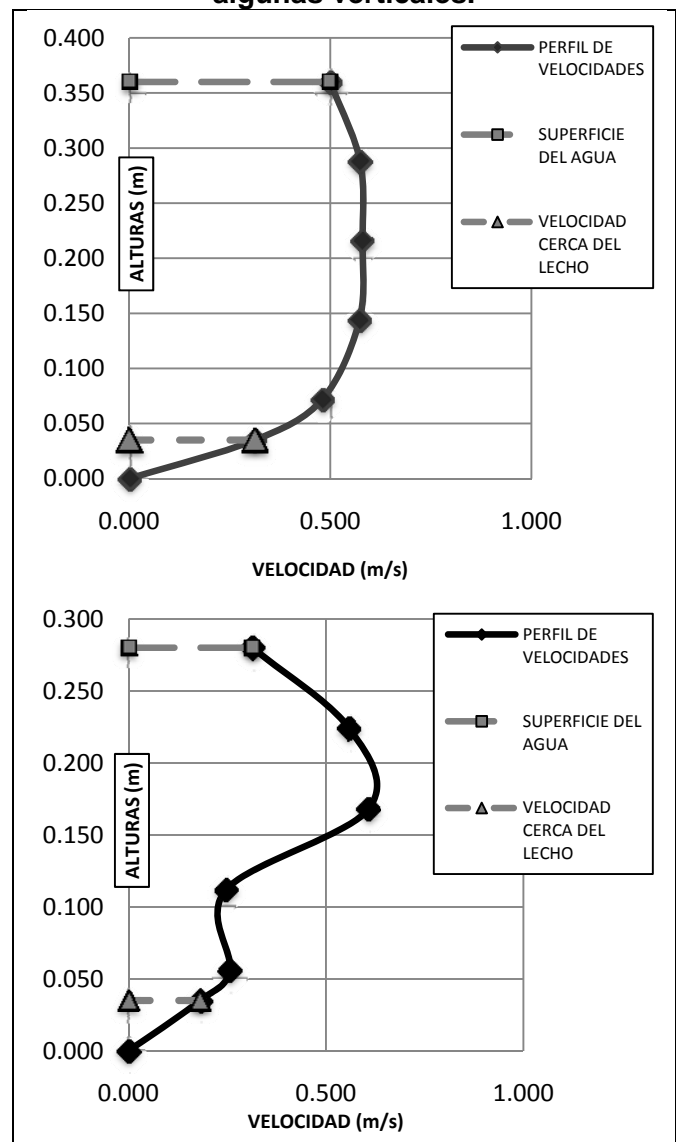
Fuente: elaboración propia.

Las concentraciones aguas abajo fueron medidas por medio de una sonda para notar la variación en el tiempo de una forma más directa.

ANÁLISIS Y COMENTARIOS

El método del molinete es un buen indicador del comportamiento de la corriente, por medio del trazo de las isotacas pueden verse las anomalías presentes y darse una explicación cuando ocurren comportamientos poco comunes en las curvas de distribución de velocidad. En la figura 5 se muestran dos ejemplos de curvas de distribución observadas, una de ellas presenta anomalías debidas a la presencia de rocas de gran tamaño en el lecho.

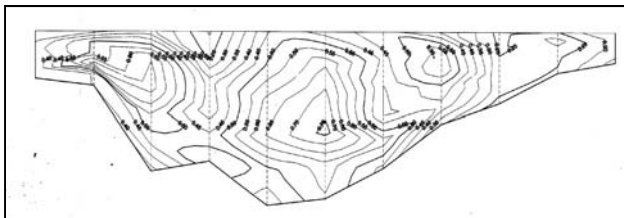
Figura 5. Curvas de velocidad obtenidas para algunas verticales.



Fuente: elaboración propia.

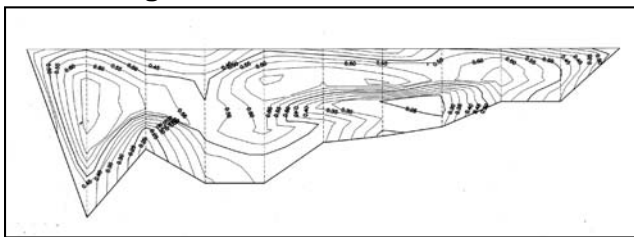
Tal como se observa en la figura, el método del molinete permite ver el comportamiento de los perfiles o curvas de distribución de velocidades, en la curva del medio puede observarse el efecto del gradiente de presión que causa la distorsión de la curva haciendo que exista una presión contraria, efecto conocido como "separación". Las pruebas realizadas deben ser evaluadas durante varios periodos del año, de tal forma que pueda verse el comportamiento del cauce en estiaje y de ser posible obtenerse las curvas de calibración o de descarga, de esa forma podría verse si los tipos de aforo llevados a cabo conducen a curvas que den valores de caudales similares. Las figuras 6, 7 y 8 muestra las isotacas resultantes para la secciones AR1, AR2 y AA, en la cual puede observarse la variación y comportamiento de las mismas, como puede notarse, dicho comportamiento repercute en las curvas de distribución de velocidades encontradas.

Figura 6. Isotacas sección AR1



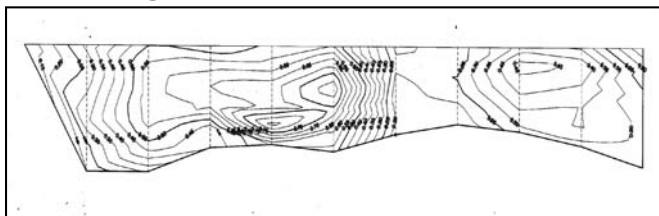
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Isotacas sección AR2



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Isotacas sección AA.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El método del molinete es un método eficiente, sin embargo su uso se ve limitado por las características de forma de la sección aforada, que hace que en algunos casos no pueda ubicársele en el cauce para determinar las velocidades.
- El aforo por inyección continua provee resultados muy cercanos a los valores de caudal obtenidos por medio del uso del molinete, las variaciones pudieron darse por la sensibilidad de la sonda al medir la concentración C_2 aguas abajo.
- Una de las ventajas del uso del molinete es permitir conocer el comportamiento de las isotacas o líneas de igual velocidad.
- El uso de aforos por trazadores permite conocer el caudal de una corriente en un menor tiempo con la desventaja de no conocerse el comportamiento del flujo y las líneas de igual velocidad.
- Además de no conocerse el comportamiento del flujo con el aforo por inyección de trazador, el equipo necesario es costoso y es necesario realizar varios para observar si el valor de caudal tiende a un valor específico.
- Dado que el aforo por inyección puntual da resultados muy variados, este puede ser utilizado como un aforo previo o de estimación.
- Al momento de establecerse una estación de aforo deben de reunirse las condiciones adecuadas para el aforo por molinete. Ya que como puede notarse, debido a la presencia de rocas, existen pérdidas de energía que causan el efecto de separación alterando el comportamiento de las curvas de distribución de velocidad.
- Otra desventaja del uso de trazadores es que en el caso de la sal común, puede ser utilizada en corrientes que presenten poca cantidad de sedimentos o contaminantes, ya que resultaría difícil su detección en un medio altamente cargado de diversas sustancias.

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, Ven Te. **Hidráulica de canales abiertos**. (Colombia; Editorial McGraw Hill, 1994) pp. 23 – 30, pp. 189 – 202.
- Streeter, Victor L. y otros. **Mecánica de fluidos**. (Novena edición, Colombia; Editorial McGraw Hill, 2000) pp. 276 – 282, pp. 328.
- OMM. **Guía de prácticas hidrológicas, OMM – No. 168**. (Quinta edición, 1994) pp. 147 – 173.
- Herschy, Reginald. **Streamflow measurement**. (Tercera edición, 2009) pp. 6 – 11, pp. 12 – 68, pp. 197 – 203, pp. 269 – 274, pp. 391 – 420.
- Corporación autónoma regional del valle del Cauca. **Manual de procedimientos hidrométricos**. (Volumen XII, Universidad del Valle, Santiago de Cali; Colombia, 2002) pp. 2.5 – 2.13.

