



Universidad
de Alcalá

**ANÁLISIS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN MEDICIONES DE CAUDAL CON
PERFILADORES ACÚSTICOS DE EFECTO DOPPLER EN AVENIDAS**

**ANALYSIS OF ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN STREAMFLOW MEASUREMENTS
WITH ACOUSTIC DOPPLER PROFILERS IN FLOODS**

Máster Universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos

Presentado por:

D. Boris González von Daniken

Dirigido por:

Dra. IRENE DE BUSTAMANTE

Alcalá de Henares, a 23 de Julio de 2019

I Índice

Índice de Figuras	3
Indice de Tablas	3
II Resumen	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2 Objetivo general	4
3 Objetivos específicos	4
4. Marco teórico	5
4.1 ADCP	5
4.2 Caudal medido con ADCP en modalidad dinámica	5
4.3 Incertidumbre	6
4.3.1 Incertidumbre típica combinada $u_c(y)$	6
4.3.2 Incertidumbre expandida U	6
4.3.3 Factor de cobertura k	6
4.3.4 Evaluación Tipo A (errores aleatorios)	7
4.3.5 Evaluación Tipo B (errores sistemáticos)	7
4.3.6 Incertidumbre Combinada	8
4.4 Estimación de la incertidumbre de las mediciones de caudal realizadas con molinetes (ISO 5168, 2005), (ISO 748, 2007)	8
4.4.1 Incertidumbre debida a errores aleatorios en mediciones con molinete	9
4.4.2 Incertidumbre sistemática en mediciones con molinetes	9
4.5 Incertidumbre en mediciones de Caudal con ADCP en modalidad estática	10
4.6. Ley de propagación de incertidumbres	11
5 Plan de Trabajo y Métodos	14
5.1 Equipos Utilizados	14
5.1.1 Especificaciones del equipo ADCP	14
5.1.2 Flotador	15
5.1.3. Software de cálculo y comunicación con el ADCP	15
5.2. Áreas no medidas del ADCP o zonas ciegas (blank distance)	15
5.3. Identificación de las fuentes de incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP StreamPro	17

5.3.1 Diferenciación de errores aleatorios y sistemáticos en la medición con ADCP	17
5.3.2. Incertidumbre de medida de caudal correspondiente a la velocidad medida por el ADCP	17
5.3.2. Incertidumbre de medida de los parámetros geométricos de la sección en mediciones de caudal en modo dinámico con ADCP StreamPro	20
5.3.3. Fuente de error asociada a la medida de la profundidad	21
5.4. Ley de propagación de incertidumbres en mediciones con ADCP en modo dinámico. Análisis de los factores determinantes en la estimación de incertidumbre en estas mediciones	22
6. Análisis de Resultados	26
7 Conclusiones	32
8 Referencias Bibliográficas	34
ANEJOS	36

Índice de Figuras

Figura 1 Representación gráfica de las componentes de errores de la incertidumbre ...	8
Figura 2 Sonda del ADCP Stream Pro (Simpson M., 2001)	15
Figura 3 Riverboat SP, flotador para avenidas (RD Instruments, 2015)	15
Figura 4 Perfil de Sección indicando Zonas ciegas en modalidad dinámica.	16
Figura 5 Hidrogramas esperados en la planificación de la maniobra de embalse, se aprecia que se espera comportamiento escalonado en las primeras estaciones y luego hidrogramas más suave a medida que transita la creciente	27
Figura 6. Perfil de velocidades del ADCP en modo estático durante la crecida, con alto transporte de sedimentos.	29
Figura 7 Perfil de velocidades para un aforo en modalidad dinámica, durante la recesión de la creciente, cuando la concentración de sedimentos había disminuido ...	30
Figura 8 Perfil de velocidades por verticales del aforo con ADCP en modalidad estática.	31
Figura 9 Río Llobregat en la sección medida, a la izquierda durante la creciente con gran transporte de sedimentos, a la derecha en la recesión, se aprecia a simple vista como reduce la turbidez.	31

Índice de Tablas

Tabla 1 carátula de un aforo con la información de la estación aforada y resumen de resultados del aforo en modo dinámico del día 9 de mayo del 2019 _____	26
Tabla 2 Resumen de resultados de caudales medidos en las dos modalidades con ADCP _____	28
Tabla 3 Resultados con las estimaciones de incertidumbre _____	29

II Resumen

En la actualidad, el avance de la tecnología en mediciones hidrológica ha incorporado instrumentos que facilitan y agilizan las labores de producción de información hidrológica, por otro lado los nuevos retos, ante un eventual cambio climático, apuntan a realizar labores de gestión de los recursos hídricos con niveles de precisión y criterios de aceptación de las medidas más estrictos. Conforme a esto se plantea una metodología para estimar la incertidumbre, o bien para avanzar hacia ese objetivo, en mediciones realizadas con perfiladores acústicos de efecto doppler (ADCP) en modalidad dinámica. Una comparación entre resultados empíricos obtenidos en las dos modalidades de medición que permiten los ADCP (estática y dinámica) en una medición en campo efectuada durante un evento especial de creciente, fue utilizada para considerar los resultados obtenidos a la hora de tomar decisiones antes de realizar mediciones de este tipo y en presencia de características similares. Se llegó a conclusiones que permiten caracterizar las propiedades de estas modalidades y sus ventajas y desventajas en diferentes etapas de una creciente. Se plantea un camino a seguir para futuros trabajos que profundicen en la estimación de incertidumbre en modalidad dinámica, considerando los factores involucrados en la introducción de incertidumbres y tras aplicar las ecuaciones de la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación teórica del caudal medido por ADCP en modalidad dinámica. Una profunda revisión bibliográfica de diversos trabajos realizados en este campo se condensa a lo largo del texto, con la finalidad de diagnosticar el estado actual del estudio en el área y dar aportes en la continuidad en las labores necesarias para llegar a una estimación de la incertidumbre en este tipo de mediciones con gran aceptabilidad y basada en fundamentos físicos y estadísticos.

1. INTRODUCCIÓN

En la generación de información hidrométrica de una red de puntos de control, se realizan mediciones de caudal, para posteriormente calibrar curvas de relación nivel caudal. Al ser la medición del caudal un parámetro inicial del proceso de producción de información hidrológica, el resto de los parámetros obtenidos a partir de éste involucrarán los errores e incertidumbres que hayan sido cometidos en el procedimiento del aforo.

Este texto se enmarca en los trabajos de apoyo al equipo de hidrología de la Agencia Catalana del Agua, que contemplan la ejecución de campañas de aforos en la red de puntos de control del sistema de gestión hidrológica en el ámbito geográfico de las competencias de este organismo. Las labores de verificación y actualización de curvas de caudal (curvas de gasto) e inspecciones de caudales concesionados a hidroeléctricas y comunidades de regantes, junto con el control del cumplimiento de los caudales de mantenimiento asociados a dichas concesiones, establecidas por la Agencia Catalana del Agua y enmarcadas en las normativas vigentes del uso del agua. El incumplimiento de los caudales concesionados puede acarrear acciones legales y posteriormente sanciones a las empresas involucradas. Es por esto que las mediciones deben realizarse con un alto control de calidad, rigiéndose por la normativa ISO 17025 de metrología para ensayos in situ, y debiendo siempre estar el resultado acompañado de un valor de incertidumbre según las normativas ISO vigentes que le correspondan.

Las mediciones ordinarias de caudal en ríos y canales, se suelen realizar con la metodología establecida en la normativa ISO 748:2007, la que contiene un método para calcular la incertidumbre de medida en aforos realizados por el método velocidad-área con medidores puntuales de velocidad. Esta metodología se estableció para instrumentos de medición del tipo molinetes, y pudiendo extenderse de forma análoga a otros equipos de medida puntual de velocidad. En los aforos con estos instrumentos, la incertidumbre de los diferentes parámetros medidos son independientes entre sí, esto no ocurre en mediciones realizadas ADCP que miden el flujo con el equipo en movimiento (modalidad dinámica). La normativa ISO 24578 (2012) expone una serie de recomendaciones para la realización de aforos con ADCP con la finalidad de disminuir, en la mayor medida posible, los errores sistemáticos: en esta normativa se hace mención que aún no se ha establecido una metodología estándar para el cálculo de la incertidumbre en aforos realizados con estos instrumentos. En la práctica se ha optado

por usar el ADCP en modo estático, separando la sección en varias estaciones por verticales, para así aplicar el cálculo de forma análoga a los equipos convencionales de medición puntual. Sin embargo, durante avenidas, las condiciones del flujo dificultan el mantener estático el instrumento, por lo que se considera importante avanzar en el estudio de posibles metodologías alternativas que permitan obtener una estimación de la incertidumbre de medida para la medición de caudal con ADCP en modo dinámico.

Como estrategia, se propuso caracterizar las fuentes de incertidumbre en este tipo de aforos y llegar al planteamiento de una ecuación de la incertidumbre para ser considerada en el diseño de futuras experiencias de campo. Identificando los factores involucrados en la incertidumbre, pueden aparecer parámetros que deben ser considerados y medidos con instrumentación complementaria, así como establecer criterios para la elección de la sección a medir y las condiciones deseables del flujo para avanzar en este estudio.

Por otra parte, se realizaron sucesivas mediciones de caudal durante un evento de maniobras del embalse la Baells, ubicado en el río Llobregat, Cataluña, España. Evento que consistió en provocar una creciente como medida de simulación de la variabilidad natural del régimen hidrológico para mantenimiento de los ecosistemas del río Llobregat. Esta creciente generada representó una oportunidad para obtener aforos que permitan calibrar la curva de gasto en la estación Llobregat en Berga (Olvan) EA066, ubicada 7 kilómetros aguas abajo de la presa. Se empleó un equipo ADCP marca RD Instrument modelo Streampro, con flotador para eventos de avenidas. Se realizaron 4 mediciones en modalidad estática y entre éstas, conjuntos de mediciones en modalidad dinámica para contrastar los resultados. Durante la creciente no se contaba con condiciones de flujo permanente, el caudal y el nivel variaban con mayor rapidez que lo que se tarda en medir la sección, los aforos en modalidad estática, demoran mayor tiempo que los realizados en modalidad dinámica, por lo que existe mayor incertidumbre en la medición por variación de caudal durante la medición. Se registraron variaciones de nivel de 7cm durante las mediciones en modalidad estática, mientras que en las mediciones en modalidad dinámica, que solo duran pocos minutos, la variación de nivel en una pasada es poco apreciable, inferior a 1cm, no así en un conjunto de múltiples pasadas (transectas).

2 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo, consiste en realizar una comparación de la calidad de las mediciones de caudal con ADCP en modalidades dinámica y estática, enfocado en las fuentes de incertidumbre de medida.

3 Objetivos específicos

Y como objetivos específicos, se persigue:

1. Determinar las diferentes componentes de la incertidumbre de medida asociados a los diferentes principios físicos de funcionamiento de los equipos ADCP en modalidad dinámica.
2. Comparar la calidad de las mediciones no simultáneas realizadas con ADCP en modalidades dinámica y estática durante un evento de creciente provocada.
3. Proponer una ecuación de estimación de incertidumbre en mediciones con ADCP en modo dinámico para ser tomada en cuenta para el diseño de futuros experimentos.
4. Elegir una ecuación para estimación de la incertidumbre en mediciones con ADCP en modalidad dinámica que sea práctica para poder comparar las mediciones realizadas en esta modalidad con las realizadas en modalidad estática.
5. Evaluar la aceptabilidad de la incertidumbre estimada con el método práctico elegido en base a las condiciones que debe tener el flujo para que dicha estimación sea confiable.

4. Marco teórico

A continuación se relacionan los conceptos teóricos utilizados para el desarrollo del trabajo.

4.1 ADCP

Un ADCP es un *perfilador acústico de efecto doppler*, un Instrumento de medición de caudal, que usa el principio de efecto doppler para medir la velocidad del agua. Emite pulsos de sonido llamados zumbidos (pings) que al encontrarse con las partículas transportadas por el fluido se dispersan ondas de sonido de retorno con diferente frecuencia a la emitida, resultando que la velocidad del flujo es proporcional a la variación de frecuencia según la siguiente relación (RD Instruments, 2015).

$$V_{rel} = \frac{CF_d}{2F_r} \quad (1)$$

Donde,

V_{rel} es la velocidad relativa entre el agua con respecto al flotador,

F_d La frecuencia de la onda emitida,

F_r La frecuencia de la onda de retorno,

C La velocidad del sonido en el medio.

4.2 Caudal medido con ADCP en modalidad dinámica

En el caso de aforos dinámicos, se mide la velocidad relativa del agua con respecto al ADCP, y usando la función de rastreo de fondo, la velocidad del ADCP respecto al lecho, con ambas velocidades se puede obtener la velocidad del agua respecto al lecho, la velocidad es medida en celdas de dimensión constante y definida por el operario, dentro de las limitaciones de diseño del instrumento. Resultando así el caudal medido por el ADCP según la ecuación 2.

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i A_i \quad (2)$$

Donde,

V_i es la velocidad del agua respecto al lecho para cada celda i ; y A_i es el área de la celda.

4.3 Incertidumbre

“Parámetro, asociado con los resultados de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente podrían ser atribuidos al mensurando.

Nota: Las incertidumbres se expresan como un valor absoluto y no toman un signo positivo o negativo” (UNE-ISO-5168, 2006).

4.3.1 Incertidumbre típica combinada $u_c(y)$

Incertidumbre típica del resultado de una medición cuando ese resultado se obtiene a partir de los valores de un número de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, que son las varianzas o covarianzas de estas otras magnitudes ponderadas según como varía el resultado de la medición con cambios en estas magnitudes.

4.3.2 Incertidumbre expandida U

Magnitud que define un intervalo alrededor del resultado de una medición que puede esperarse abarque una gran fracción de la distribución de valores que podrían razonablemente atribuirse al mensurando.

NOTA: La fracción puede considerarse como la probabilidad de cobertura o el nivel de confianza del intervalo.

4.3.3 Factor de cobertura k

Factor numérico utilizado como un multiplicador de la incertidumbre típica combinada

para obtener una incertidumbre expandida. Depende de la distribución de probabilidad con la que se evalúa la muestra, suele emplearse la distribución normal en presencia de errores aleatorios y con muestras representativas, cuando las muestras son pequeñas se suele usar la distribución T de Student.

NOTA: Típicamente un factor de cobertura, para 95% de confianza, está en el margen de 2 a 3.

4.3.4 Evaluación Tipo A (errores aleatorios)

Método de evaluación de incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones. Específicamente son métodos que utilizan la dispersión de un número de mediciones.

La incertidumbre asociada a los errores aleatorios al nivel de 95% de confianza debería calcularse como:

- (a) $2\sigma_Y$ en el caso de que se trate de un gran número de mediciones;
- (b) $t\sigma_Y$ en el caso de que se trate de un pequeño número de mediciones;

σ_Y es la desviación típica verdadera, estimada mediante la desviación típica s_y de las mediciones de la variable Y; t es un valor de la distribución T de Student (OMM, 2006).

4.3.5 Evaluación Tipo B (errores sistemáticos)

Método de evaluación de incertidumbre por otros medios distintos al análisis estadístico de un conjunto de observaciones.

En la figura 1 puede apreciarse una representación gráfica de las componentes de la incertidumbre de medida.

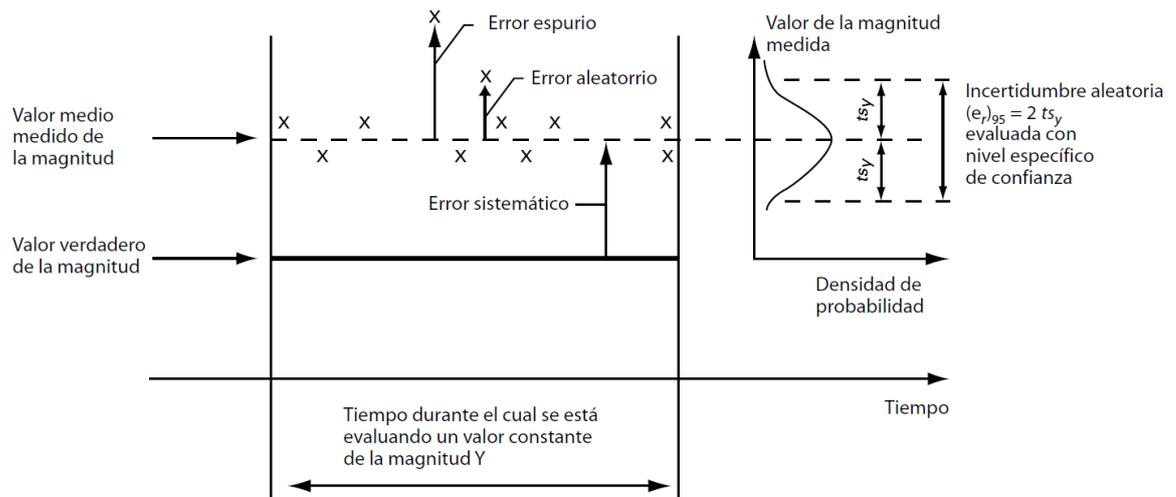


Figura 1 Representación gráfica de las componentes de errores de la incertidumbre

4.3.6 Incertidumbre Combinada

Una vez determinados todos los factores que introducen errores en la medición, las incertidumbres típicas de las magnitudes de entrada y sus coeficientes de sensibilidad asociados c_i , puede determinarse la incertidumbre total de la magnitud de salida de acuerdo con la ecuación:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (3)$$

4.4 Estimación de la incertidumbre de las mediciones de caudal realizadas con molinetes (ISO 5168, 2005), (ISO 748, 2007)

La sección del cauce se divide en segmentos por m verticales. La anchura, profundidad y velocidad media correspondientes a la i ésima vertical se designan por b_i , d_i y \bar{v}_i , respectivamente. En este caso, el caudal calculado es:

$$Q = F_m \sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i) \quad (4)$$

4.4.1 Incertidumbre debida a errores aleatorios en mediciones con molinete

Donde el factor F_m se aproxima a 1 cuando el número de verticales m aumenta. En los cálculos reales se supone que m es suficientemente grande para hacer que $F_m \approx 1$.

La incertidumbre generada por errores aleatorios será:

$$(E_Q)_r^2 = (e_{Fm})^2 + \frac{1}{m} [(E_b)_r^2 + (E_d)_r^2 + (E_{\bar{v}})_r^2] \quad (5)$$

En la derivación se han hecho las siguientes hipótesis para efectos de simplificación: los caudales parciales b_i , d_i , v_i son casi iguales y las incertidumbres $(E_{b_i})_r$, $(E_{d_i})_r$ y $(E_{\bar{v}_i})_r$ son también casi iguales para todas las i y tienen los valores $(E_{b_i})_r$, $(E_{d_i})_r$ y $(E_{\bar{v}_i})_r$ respectivamente. Entonces $(E_{\bar{v}})_r$ puede descomponerse de la siguiente manera:

$$(E_{\bar{v}})_r^2 = (E_p)_r^2 + (E_c)_r^2 + (E_e)_r^2 \quad (6)$$

En donde:

$(E_p)_r$ es la incertidumbre debida al número limitado de puntos de la vertical;

$(E_c)_r$ es la incertidumbre de la medida del molinete (se obtiene en la calibración del equipo);

$(E_e)_r$ es la incertidumbre debido a las fluctuaciones del flujo.

4.4.2 Incertidumbre sistemática en mediciones con molinetes

La ecuación para calcular el porcentaje sistemático general de incertidumbre es:

$$(E_Q)_s^2 = (E_b)_s^2 + (E_d)_s^2 + (E_c)_s^2 \quad (7)$$

En donde:

$(E_b)_s$ es el porcentaje de incertidumbre sistemática del instrumento que mide la anchura;

$(E_d)_s$ es el porcentaje de incertidumbre sistemática del instrumento que mide la profundidad;

$(E_c)_s$ es el porcentaje de incertidumbre sistemática del tanque de calibración del

molinete.

La incertidumbre general de una sola medición de caudal con molinete (incertidumbre aleatoria y sistemática juntas) es:

$$E_Q = \sqrt{(E_Q)_r^2 + (E_Q)_s^2} \quad (8)$$

4.5 Incertidumbre en mediciones de Caudal con ADCP en modalidad estática

Las mediciones con ADCP en modalidad estática, guardan similitudes con la medición de caudal con molinetes, la medición del ancho y el posicionamiento del equipo separando la sección perpendicular al flujo en m verticales, se realiza con un instrumento de medida de distancia, cinta métrica para secciones no muy anchas (<50m por lo general), pudiéndose usar otros dispositivos para medidas cuando el ancho es mayor, por ejemplo, teodolitos; la profundidad en cada vertical puede medirse bien por el haz acústico del ADCP o con una barra de vadeo, cable con contra peso o similares. Por lo tanto, y es lo que muchos hacen en la práctica, se puede usar la misma ecuación para el cálculo de incertidumbre que en mediciones con molinetes, solo hay que considerar algunos términos ya que el ADCP mide la velocidad con un principio diferente:

La velocidad es medida en múltiples celdas en la vertical, teniendo solo áreas sin medir cerca de la superficie del agua y cerca del fondo. La extrapolación en estas áreas suele hacerse por el método potencial, que coincide con el perfil teórico en el que se fundamentan los métodos de medición puntual contenidos en la norma ISO 748:2007.

El ADCP mide la velocidad con el principio doppler y no de forma mecánica, los fabricantes suelen asegurar que lo hacen con una precisión (en el caso del RDI Streampro) de $\pm 1\%$ de la velocidad o $\pm 0,002\text{m/s}$. En la práctica, los errores de velocidad irán asociados a los mismos factores posteriormente descritos en la sección 5.3, donde los más influyentes son el ruido por heterogeneidad del sedimento en suspensión en el flujo, turbulencias, y cambio de ángulo de medida por imposibilidad de mantener el flotador completamente estático y horizontal. Estos errores son aleatorios, por lo que se disminuyen aumentando el tiempo de muestreo, normalmente de 40 a 60s.

En un estudio realizado (Lee k. et al.-2014) se halló que la desviación estándar de las velocidades medidas por los 4 haces de un equipo StreamPro, tiende a reducirse al cabo del tiempo. En la práctica, si se mantiene el equipo estable, este efecto puede apreciarse, el software muestra la desviación estándar de la velocidad y del ángulo con respecto al norte de la brújula. En caso de que la primera supere el 10% o el segundo 20°, el software advierte y recomienda extender la medición unos segundos más.

La profundidad durante avenidas es muy difícil de medir con precisión, medir la incertidumbre requiere de medidas especializadas y buenos recursos, de lo contrario hay que aceptar la medida aportada por el ADCP aunque puede estarse generando errores por ruidos, al rebotar las ondas con las partículas cercanas al fondo, además puede haber absorción importante de la onda en el material del lecho, de todas formas la incertidumbre de la profundidad también será un error aleatorio y se reduce al aumentar el tiempo de muestreo siempre que su distribución de probabilidad sea simétrica.

En la práctica, la incertidumbre en los aforos con ADCP en modalidad estática se estima mediante una ecuación análoga a la de los aforos con molinetes (ISO 748,2007) (Teledyne Instruments, 2015).

$$u_Q = \sqrt{u_m^2 + u_{cal}^2 + \frac{u_b^2}{Q^2} \sum_{i=1}^m \sigma_{qi}^2 + \frac{1}{Q^2} 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sigma_{qi}^2 \sigma_{qi+1}^2 r_{i,j+1}} \quad (9)$$

4.6. Ley de propagación de incertidumbres

El primer paso en una evaluación de incertidumbre es definir el proceso de medición. Normalmente, para la medición de caudal será necesario combinar los valores de un número de magnitudes de entrada para obtener un valor para la salida. La definición del proceso debería incluir la enumeración de todas las magnitudes apropiadas de entrada.

Si se tiene una variable funcional que depende de varias magnitudes medidas, en nuestro caso el caudal.

$$Q = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (10)$$

La incertidumbre en la medida de caudal q será una función de las incertidumbres de las magnitudes que componen a la función original Q , quedando.

$$q = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

Pueden distinguirse los dos tipos de incertidumbres: Tipo A y Tipo B. Las de Tipo A pueden

Calcularse a partir de la desviación estándar de una muestra de mediciones independientes entre sí.

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (X_{i,m} - \bar{X}_i)^2} \quad (12)$$

La desviación típica del valor medio

$$S(\bar{X}_i) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

En general para una función dependiente de parámetros medidos, cada uno con sus incertidumbres asociadas, siempre que sean independientes de otros parámetros puede establecerse la siguiente relación para la obtención de la incertidumbre:

$$\delta Q = \sum_1^n \delta X_i \frac{\partial Q}{\partial X_i} \quad (14)$$

Cuando hay parámetros cuyas incertidumbres son dependientes a la vez de la incertidumbre de otros parámetros, lo correcto es que aparezcan términos de las derivadas parciales cruzadas, de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\partial Q}{\partial X_i} \frac{\partial Q}{\partial X_j} \delta X_i \delta X_j \quad (15)$$

Por último, para que la ley de propagación sea correcta, todos sus términos de incertidumbres deben tener el mismo nivel de confianza o grado de cobertura.

La mejor estimación de incertidumbres será según la expresión:

$$\delta Q^2 = \sum_1^n \left(\delta X_i \frac{\partial Q}{\partial X_i} \right)^2 \quad (16)$$

$$\delta Q^2 = \sum_1^n \left(\frac{\partial Q}{\partial X_i} \frac{\partial Q}{\partial X_j} \delta X_i \delta X_j \right)^2 \quad (17)$$

5 Plan de Trabajo y Métodos

5.1 Equipos Utilizados

5.1.1 Especificaciones del equipo ADCP

Para este trabajo se utilizó un ADCP marca RDI, modelo StreamPro, el cual posee las siguientes especificaciones y limitaciones:

Especificación	Descripción
Perfilador de Caudal:	
Número de celdas por vertical	1-30
Tamaño vertical de celda	2cm-20cm
Resolución de velocidad	0,1cm/s
Rango de perfilación	0,1m a 6m
Rango de velocidad del agua	±5m/s
Precisión	±1% del caudal relativo al ADCP, ±2mm/s
Distancia de tapa	3cm
Frecuencia de salida de datos	1Hz
Rastreo de fondo:	
Rango de profundidad	0,1m–7m
Precisión	±1% de movimiento del fondo relativo al ADCP, ±2mm/s
Resolución	1mm/s
Transductor:	
Frecuencia	2MHz
Configuración Janus de 4 haces con 20° de amplitud de haz	

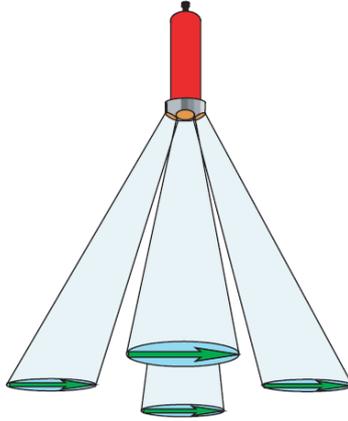


Figura 1 Sonda del ADCP Stream Pro (Simpson M., 2001)

5.1.2 Flotador

Se empleó un flotador modelo Riverboat SP diseñado para otorgar mayor estabilidad al equipo en condiciones de gran caudal y velocidad del flujo.



Figura 2 Riverboat SP, flotador para avenidas (RD Instruments, 2015)

5.1.3. Software de cálculo y comunicación con el ADCP

Se empleó los software WinRiver II, versión 2.20.0.0 (2016), para modalidad dinámica y SxS PRO, versión 1.15 (2015), para modalidad estática, ambos desarrollados por Teledyne RD Instruments.

5.2. Áreas no medidas del ADCP o zonas ciegas (blank distance)

Todos los ADCP poseen unas franjas de la sección perfilada en las que no es posible medir o bien no se desea medir por considerarse que poseen perturbaciones por el propio instrumento y su flotador. En esas franjas el Caudal se estima por extrapolación de las velocidades medidas por el equipo.

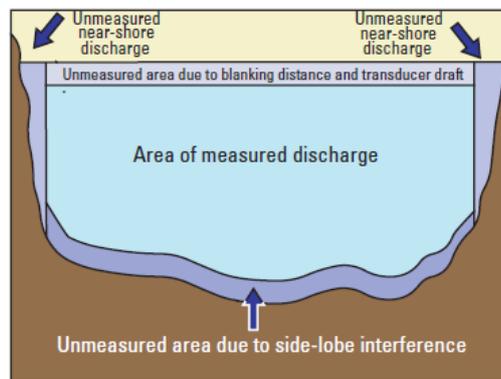


Figura 3 Perfil de Sección indicando Zonas ciegas en modalidad dinámica.

En la figura 4 puede apreciarse que el ADCP separa la sección perfilada en 4 zonas, tres de estas son estimadas por extrapolación y corresponden a las zonas cercanas a los contornos: cerca del fondo, donde el instrumento no alcanza a medir para evitar mediciones alteradas por el ruido ocasionado por la superficie sólida, vorticidades asociadas a la rugosidad e irregularidad del lecho, mayor arrastre de partículas y de mayor tamaño que en el resto de la sección; dos zonas en cada margen de la sección, donde aparte de presentar situación similar al fondo en cuanto a vorticidades y efectos de la rugosidad, se suma la elevada pendiente de los taludes que interrumpen algunos haces del transductor del equipo dando mala correlación entre los 4 sensores acústicos.

Los programas informáticos que controlan las mediciones con ADCP realizan estimaciones de la velocidad en estas zonas ciegas, a partir de las velocidades medias de los conjuntos de celdas más próximos a estas zonas que den un valor aceptable. El usuario puede elegir la forma del margen (cuadrado o triangular por lo general).

Se puede intuir, que en la mayor parte de los casos, el flujo que discurre en las cercanías de los márgenes y el fondo es poco representativo para el caudal total, ya que las velocidades son sustancialmente inferiores en estas zonas, no ocurre lo mismo para el flujo en la zona en que está sumergido el transductor, en contacto con la superficie libre del agua, en donde las velocidades suelen ser superiores a la media, debido a esto, en

la práctica, es recomendable que esta distancia sea la menor posible para asegurar que el sensor no salga del agua durante los movimientos del flotador, y debe medirse, cuanto se ha sumergido el transductor, con aceptable precisión. En las mediciones realizadas para este trabajo, se calculó esta profundidad con la diferencia entre la profundidad total medida utilizando barras de vadeo convencionales calibradas y la profundidad efectiva que se obtiene con el ADCP, promediando en tres puntos diferentes de la sección, dos cercanos a los márgenes y uno en el centro.

5.3. Identificación de las fuentes de incertidumbre en mediciones de caudal con ADCP StreamPro

5.3.1 Diferenciación de errores aleatorios y sistemáticos en la medición con ADCP

Durante las mediciones de cualquier magnitud o mesurando, se incurren en errores aleatorios y errores sistemáticos, los errores aleatorios pueden disminuirse mediante la media, este enfoque es válido siempre que la distribución de los valores medidos tengan simetría respecto a la media, debe tenerse además una muestra lo suficientemente representativa, lo que normalmente es muy difícil de tener en la práctica.

5.3.2. Incertidumbre de medida de caudal correspondiente a la velocidad medida por el ADCP

La incertidumbre de medida de la velocidad de un equipo ADCP en modo dinámico incluye muchas fuentes de error asociadas y que además dependen de las características propias del lugar de medición y las condiciones que rigen el flujo en el momento de la medición, la alta variabilidad temporal de estas condiciones para una misma sección hace que sea muy difícil sino imposible, determinar una relación estadística generalizada aplicable al instrumento, en vez de esto, es conveniente emplear un método que se aplique en cada medición. La velocidad del flujo medida en modalidad dinámica con ADCP se calcula a partir de la velocidad relativa del flujo con respecto al instrumento y la velocidad del instrumento relativa al fondo del canal.

La velocidad del flujo medido por el ADCP es un vector por lo que tiene magnitud y dirección. El equipo ADCP modelo StreamPro, mide la velocidad en la dirección de cada

uno de sus cuatro haces, para obtener un vector tridimensional a partir de estas componentes de velocidad, es necesario utilizar 3 de las velocidades medidas en la dirección de los haces, el valor medido por el cuarto haz es redundante y se usa para aplicar una corrección a los errores asociados a movimientos de cabeceo y rotación del flotador. Las ecuaciones para calcular las componentes de la velocidad relativa del flujo con respecto al flotador son las siguientes (USGS, 2009):

$$V_x = \frac{(B_1 - B_2)}{2 \sin \theta} ; V_y = \frac{(B_4 - B_3)}{2 \sin \theta} ; V_z = \frac{(B_1 + B_2 + B_3 + B_4)}{4 \cos \theta}$$

(18), (19) y (20).

Donde: B_1, B_2, B_3 y B_4 son las componentes de la velocidad en los ejes de los haces 1, 2, 3 y 4 respectivamente, con el haz 3 ubicado en el extremo aguas arriba. θ es el ángulo de inclinación de los haces respecto a la vertical. V_x Componente de la velocidad relativa en dirección a la sección perpendicular al flujo (trayectoria del flotador a través de la sección), V_y velocidad relativa en dirección del flujo, y V_z componente vertical de la velocidad relativa.

El cuarto haz redundante sirve para calcular el error de velocidad según la siguiente expresión y es utilizado para aplicar corrección por el software interno:

$$V_{error} = \frac{(B_1 + B_2 - B_3 - B_4)}{2 \sqrt{2} \sin \theta} \quad (21)$$

5.3.2.1. Errores en la velocidad asociados al cabeceo y rotación durante la medición

El cabeceo del flotador introduce errores apreciables en la medición de la velocidad, cuando oleaje superficial o bien inestabilidad del flujo o del procedimiento escogido para desplazar el flotador producen movimientos ondulatorios del instrumento, el ángulo de incidencia de los haces acústicos del ADCP presentarán inclinación por lo que las componentes de velocidad calculadas con las ecuaciones 1,2 y 3, presentarán error de ángulo. El Instrumento posee capacidad de reducir este error a partir de la medición del cabeceo mediante un inclinómetro. Para la corrección de rotación utiliza una brújula interna que debe calibrarse en cada sitio de medición para corregir posibles declinaciones magnéticas locales. En el alcance planteado en este trabajo se estima que las correcciones internas del equipo son suficientes, además se tomó el mayor cuidado posible durante las mediciones para garantizar estabilidad en el movimiento a lo largo de la sección y reducción de los efectos de cabeceo y rotación. Sin embargo, se

propone la necesidad de inferir más en este apartado en futuros trabajos, que con suficientes mediciones e introduciendo variabilidad de cabeceo y rotación controlada, orienten a ampliar el conocimiento del error producido por estos movimientos.

5.3.2.2. Los errores sistemáticos en la medición de velocidad con ADCP

Los factores más determinantes en la presencia de errores en las mediciones de velocidad del flotador por medio del rastreo de fondo son:

- (1) Presencia de fondo móvil. Este trabajo limita el estudio a lechos estáticos. Los sedimentos en forma de transporte de fondo dan errores en el trazado de la trayectoria del ADCP, porque la consideración para el cálculo de la velocidad del flotador con respecto al lecho supone que el lecho es estático, existen formas de detectar el lecho móvil y aplicar correcciones, el software WinRiver II incluye un test de lecho móvil pero eso introduce otras fuentes de incertidumbre que complican aún más el proceso de determinación de la incertidumbre de medida.
- (2) Grandes concentraciones de sedimentos o bien no distribuidos uniformemente en la sección. Gran concentración de sedimentos produce atenuación importante en la intensidad de la onda acústica de retorno.
- (3) Cambios bruscos de velocidad en el recorrido del flotador a lo largo de la sección (aceleraciones importantes).
- (4) Movimiento de cabeceo y rotación del instrumento con su flotador.

5.3.2.3. Incertidumbre en la medida del ángulo de dirección de la velocidad

Los errores de medición del ángulo de la velocidad pueden ser inducidos por dos fuentes (Lee et al, 2013):

- (a) Oblicuidad de la trayectoria del instrumento (inclinación lateral respecto a las líneas de corriente en el caso de modalidad estática).
- (b) Error de calibración de la brújula del instrumento. Se halló que un error de ángulo

entre 5% y 10% introduce una sobrestimación de caudal entre 0.38% y 1.31% en el caudal total.

Durante las mediciones realizadas para este trabajo se tomaron fuertes medidas en cuanto a calibración de la brújula (criterio de aceptación: inferior a 0.5 grados de error en el test de calibración) y perpendicularidad de la trayectoria del instrumento con respecto a la dirección del flujo.

5.3.2. Incertidumbre de medida de los parámetros geométricos de la sección en mediciones de caudal en modo dinámico con ADCP StreamPro

A parte de la velocidad este instrumento, en modalidad dinámica, mide o calcula los parámetros geométricos que entran en el cálculo final del caudal. Los parámetros geométricos corresponden al ancho, o bien la posición del instrumento durante la trayectoria, y la profundidad de la sección en cada conjunto de zumbidos.

Para medir la trayectoria y la profundidad, el StreamPro utiliza el sistema de rastreo de fondo, además pueden agregarse accesorios que miden la profundidad con eco-sondeo y la trayectoria con sistema satelital de posicionamiento global, el equipo utilizado para este trabajo solo cuenta con el sistema de rastreo de fondo, que se fundamenta en ubicar el fondo donde la intensidad de onda acústica de retorno posee el valor máximo en una vertical. Las partículas suspendidas en el flujo, normalmente pequeñas, reflejan poca intensidad de la onda acústica, las partículas de mayor tamaño o con mayor concentración en el flujo reflejarán mayor intensidad de onda acústica, así es de esperar que el lecho del río retornará la mayor intensidad de onda acústica.

A través de la frecuencia de la onda acústica reflejada por el fondo el ADCP puede conocer la velocidad a la que se desplaza por la relación del efecto doppler, análoga a la ecuación (1).

$$V_f = \frac{CF_d}{2F_r} \quad (22)$$

Donde,

V_f es la velocidad del flotador,

F_d La frecuencia de la onda emitida,

F_r La frecuencia de la onda de retorno,

C La velocidad del sonido en el medio.

A partir de la velocidad del flotador medida por la ecuación anterior y el tiempo de desplazamiento, se puede conocer de forma indirecta la distancia D recorrida hasta un tiempo t , en la dirección del desplazamiento.

$$D = V_f t \quad (23)$$

5.3.3. Fuente de error asociada a la medida de la profundidad

El StreamPro puede medir la profundidad usando el tiempo que tarda el sonido emitido por sus transductores en reflejarse en el lecho y retornar a la fuente de origen, la profundidad en cada posición será estimada a partir del promedio de los cuatro haces.

$$Z = \frac{ct}{2} \quad (24)$$

Donde,

C es la velocidad del sonido en el medio y t el tiempo entre el pulso emitido y el recibido, el factor igual a 2 es porque el eco de la onda recorre dicha distancia dos veces, ida y vuelta.

La medida de la profundidad depende de que el sistema de rastreo de fondo determine con precisión la posición del lecho, para esto, al igual que en el caso de la velocidad del flotador, el fondo debe ser estático para reflejar de forma eficiente la onda acústica, la concentración de sedimentos homogénea y además que los cuatro haces reboten con el lecho en su totalidad. En las cercanías a los márgenes, donde hay taludes o desniveles importantes del lecho, la medición el fondo con el StreamPro produce resultados con problemas, por no existir buena correlación entre la medición de los cuatro haces, por lo que el equipo, en algunos de esos casos, traza el lecho con discontinuidades y con valores notablemente erróneos (por lo general profundidades muy superiores a las reales).

5.4. Ley de propagación de incertidumbres en mediciones con ADCP en modo dinámico. Análisis de los factores determinantes en la estimación de incertidumbre en estas mediciones

La resolución de este problema no es nada sencillo, las mediciones con ADCP contienen muchos factores de incertidumbre que no solo dependen del equipo sino de las condiciones del lugar donde se realiza la medida y que además son condiciones propias del instante de tiempo en que se dan, además las incertidumbres de medida de las diferentes variables que definen al caudal (velocidad del agua, profundidad y posición en el ancho de la sección) no son independientes unas de otras, la velocidad del agua se calcula referente a la velocidad del flotador, y de la velocidad del flotador, a su vez, depende la coordenada de posición que al final se convierte en la medida del ancho. Por lo que aparecerán términos del tipo de la ecuación (17).

La ecuación teórica general para calcular caudal a partir de mediciones por efecto doppler, en modalidad dinámica, separando una sección en celdas de medidas de velocidad (Simpson, 2001):

$$Q = \int_0^t \int_0^d ((\bar{V}_w \times \bar{V}_b) \cdot \bar{k}) dz dt \quad (25)$$

Donde Q es el caudal, \bar{V}_w y \bar{V}_b los vectores de las velocidades del agua y del flotador, \bar{k} el vector unitario en dirección perpendicular al plano de los vectores de velocidad (en condiciones ideales es vertical), t el tiempo total de medición, d la profundidad en cada vertical de celdas o conjunto (ensamble) de zumbidos (pings), dz es la diferencial de profundidad y dt la diferencial de tiempo.

Basándose en la ley de propagación de errores, al ser el caudal una función de unos parámetros cuyas medidas involucran incertidumbres, la incertidumbre del caudal total será de la misma forma, una función de estas incertidumbres, cada término se representa con las ecuaciones 16 y 17 dependiendo si es independiente o no unos de los otros. Según Herschy (2009), los factores que introducen error en mediciones con ADCP, que deben evaluarse por separado, son los siguientes:

u₁ Resolución espacial (el equipo asume la velocidad en una celda centrada entre 4 haces acústicos con ángulos divergentes, a medida que avanza en profundidad, más diferencia hay entre el volumen medido y el asumido).

u₂ Ruido acústico (aumenta en flujo turbulento, con la concentración de sedimentos en suspensión y en aguas poco profundas por cercanía al lecho).

u₃ ambigüedad de velocidad (el ADCP mide con ángulos desfasados entre diferentes pulsos)

u₄ interferencia de lóbulo lateral (estimada por ajuste de curva potencial)

u₅ resolución temporal (la velocidad es muestreada con intervalos de tiempos de la misma duración, entre intervalos el instrumento se desplaza, por ello debe ser lo más cercano a cero para eliminar este error)

u₆ velocidad del sonido (el ADCP asume la temperatura del agua constante e igual a la de su sensor que está cercano a la superficie, asume además la salinidad constante que es el principal parámetro que afecta a la velocidad del sonido, por lo general los ríos se asumen con salinidad cero, el río Llobregat puede ser un caso especial por tener formaciones de sal en su cuenca)

u₇ ángulo de los haces (depende de las tolerancias de fabricación del equipo)

u₈ velocidad del flotador (mucha velocidad del bote involucra mayor error)

u₉ tiempo de muestreo (no es tan crítico para el caudal pero sí para la velocidad media)

u₁₀ cerca del transductor (el periodo de espera del zumbido de retorno causa un tiempo ciego que genera errores en las celdas superiores (próximas al transductor)

u₁₁ referencia de la velocidad del flotador (mide la columna de agua referida a la velocidad del flotador)

u₁₂ Profundidad (tiempo de transmisión del rastreo de fondo y profundidad de sumersión del transductor)

u₁₃ posicionamiento de las celdas (coloca la primera celda en que logra medir y el resto sucesivas a esta según la longitud que se especifique, que no necesariamente coincide con la real)

u₁₄ rotación (movimiento de rotación, cabeceo y perturbaciones por oleajes e inestabilidades al moverse)

u₁₅ tiempo (necesario para establecer la velocidad y la posición del flotador y debe esperar que retorne antes de emitir un sonido nuevo)

u₁₆ edge (distancia de la primera medición que puede realizar cerca de los márgenes, esa área la extrapolará, con los errores que esto acarrea)

u₁₇ modelo de perfil vertical de velocidades

u₁₈ modelo de caudal (modelos de velocidad área son usados en el algoritmo que calcula)

u₁₉ sumas finitas (como se hace en aforos con molinete, debe hallarse una relación similar al número de verticales)

u₂₀ elección del lugar y operatividad (un parámetro muy subjetivo, elegir lugares sin convergencia o divergencia de flujo cercano, sin corrientes secundarias, con condiciones estables, poner atención a la posibilidad de fondo móvil, de haberlo hay que realizar test de fondo móvil y aplicar las correcciones pertinentes, aunque por lo general en estos casos, la modalidad estática es recomendable ya que no usa rastreo de fondo para el posicionamiento a través de la sección del flujo)

Se han propuesto varios métodos para estimar la incertidumbre del caudal medido con ADCP en modo dinámico, todos suelen requerir un gran número de transectas medidas y de condición de flujo permanente entre los transectas. Una solución teórica presentada por (Huang, 2008), se basa en un gran número de suposiciones ideales, la sección elegida debe ser perpendicular al flujo, la velocidad del flotador debe ser menor a la velocidad media del agua y permanecer constante a lo largo del recorrido, no considera fondo móvil, considera que la distribución de los caudales medidos en sucesivos

transectas se distribuyen de forma normal.

Se considera que es la más adecuada para el caso de la creciente que se ha realizado en este trabajo, ya que al haber notables cambios del flujo en el tiempo, no se pudo hacer un gran número de transectas. Por la simplicidad de la ecuación puede ser usada como parámetro para las comparaciones propuestas, se basa en la desviación estándar de la medida, por lo que se intuye la posibilidad de estar sobreestimando la incertidumbre de esta forma.

$$E_Q = \frac{2}{\sqrt{M}} \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \quad (26)$$

Donde, M es el número de transectas, 2 corresponde al coeficiente para factor de cobertura de 95% según la distribución normal, σ_Q la desviación estándar del caudal entre diferentes transectas, \bar{Q} la media del caudal entre transectas, y E_Q la incertidumbre relativa teórica, acorde a la teoría de la ley de incertidumbres, para un aforo con ADCP broadband en modo dinámico.

6. Análisis de Resultados

En la tabla 1 se puede apreciar los datos correspondientes a la ubicación y características generales de la estación donde se realizaron las mediciones.

TIPO DE ACTUACIÓN:	Aforo	HORA INICIAL :	16:12
FECHA:	09/05/2019	HORA FINAL:	16:24
NOMBRE DE ESTACIÓN:	Olvan-Can Rosal	CODIGO ESTACIÓN:	EA066
RÍO:	Llobregat	CUENCA:	Llobregat
LOCALIZACION DEL PUNTO DE AFORO: (Coordenadas UTM ETRS89)	X= 407241 Y= 4659812 Z= 490	M M Msnm	
EQUIPO DE AFORADORES:	Fabio Nogueira, Boris González, Elena Rallo		
INSTRUMENTO DE MEDIDA:	ADCP Teledyne instruments nº 2100		
TIPO DE CURSO DE AGUA:	Río		
MATERIAL MÁRGENES:	MD: Hormigón; MI: Roca	MATERIAL LLIT / SOLERA:	Roca y cantos de gran tamaño
ANCHO DE LA SECCIÓN:	20,20 m	PROFUNDIDAD MEDIA:	1,43 m
LECTURA ESCALA (i):	1,06 m	LECTURA ESCALA (f):	1,02 m
CAUDAL:	38,349 m ³ /s	±	m ³ /s
VELOCIDAD MEDIA DE LA SECCIÓN:	1,246 m/s	TEMPERATURA MEDIA DEL AGUA	12,6 °C

Tabla 1 carátula de un aforo con la información de la estación aforada y resumen de resultados del aforo en modo dinámico del día 9 de mayo del 2019

El día 9 de mayo del 2019 se realizaron maniobras del embalse La Baells, ubicado cerca de la ciudad de Berga, Cataluña, para generar una crecida con fines de mantenimiento de la calidad ecológica del río Llobregat en sus tramos medio y bajo. El informe proporcionado por el equipo de gestión de embalses de la Agencia Catalana del Agua, donde se aprecian los hidrogramas esperados en distintas estaciones ubicadas aguas abajo de la presa tras la apertura de las compuertas se muestra a continuación en la figura 5.

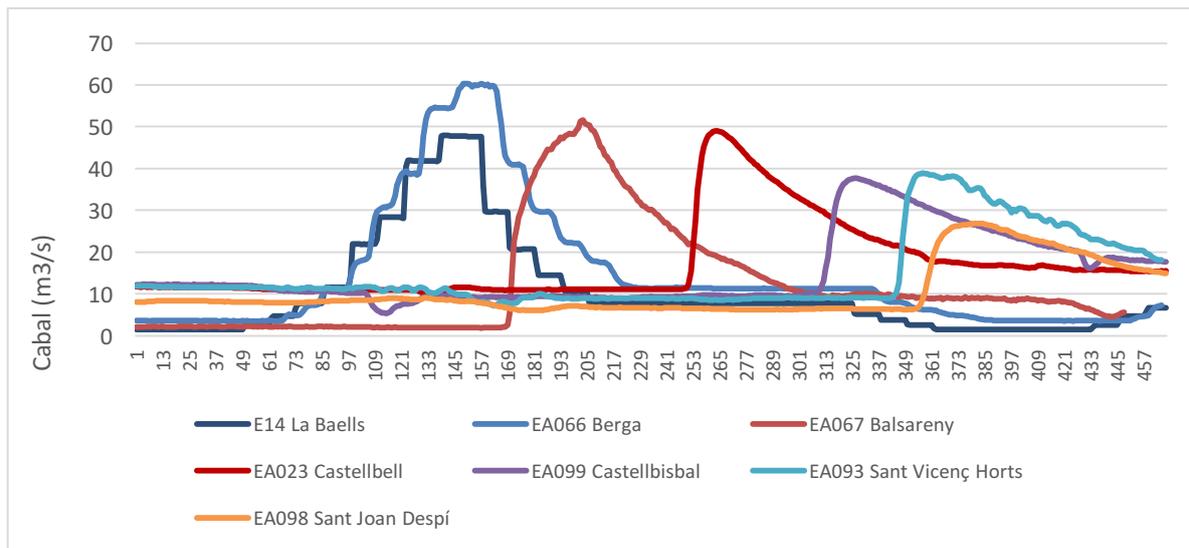


Figura 4 Hidrogramas esperados en la planificación de la maniobra de embalse, se aprecia que se espera comportamiento escalonado en las primeras estaciones y luego hidrogramas más suave a medida que transita la creciente por la cuenca

La estación EA066 Llobregat en Berga (Olvan), es una de las más cercanas a la presa, el tiempo de tránsito esperado hasta este punto es de una hora, el hidrograma esperado tiene forma escalonada ya que por su cercanía al embalse se esperaba un comportamiento de respuesta similar a las aperturas escalonadas de las compuertas, comportamiento que se suaviza a medida que el hidrograma transita por el río, este comportamiento escalonado fue determinante para elegir la estación para realizar las mediciones, ya que se esperaba contar con períodos de estabilidad (flujo casi permanente) suficientemente largos para realizar los aforos, cada aforo se inició cuando transcurridos unos 5 minutos, no se apreciaba cambios en el nivel en la escala, adicionalmente durante el aforo se hacían sucesivas lecturas de la escala para determinar si se producían cambios. La realidad no coincidió con el comportamiento esperado, aunque sí hubo un cierto comportamiento escalonado, el nivel no permaneció estable durante los tiempos como que se preveía en la planificación, presentando cambios significativos durante los aforos de mayor duración. En los aforos en modalidad estática, se decide reducir el tiempo de muestreo de velocidades en cada vertical a 40s (inicialmente se propuso tener tiempos de muestreo de 60s), y reducir el número de verticales al mínimo aceptable para agilizar el proceso de medición (aunque esto no cumpla las recomendaciones de la normativa ISO 748,2007), teniendo un promedio de duración para cada aforo en esta modalidad de 22 minutos, se realizan un total de 8 aforos, 4 en modalidad dinámica y 4 en modalidad estática, cuyos resultados se exponen en la tabla 2.

Hora UTC	Nivel (m)	Caudal por curva de gasto VISCAT (m3/s)	Caudal aforado (m3/s)	Método de aforo
9:15	0,9055	30,486	25,923	Estático
9:25	0,90875	30,474	30,77	Dinámico
10:00	0,99275	38,596	37,004	Dinámico
12:00	1,16215	55,723	52,748	Estático
12:20	1,21381	60,295	56,946	Estático
12:50	1,20914	59,86	60,345	Dinámico
14:20	1,01502	40,962	38,921	Dinámico
14:30	1,01223	40,687	38,349	Estático

Tabla 2 Resumen de resultados de caudales medidos en las dos modalidades con ADCP

En esta tabla, se puede ver el resultado de los aforos y las lecturas de escala, contrastados con el caudal calculado por curva de gasto, además se detalla la hora en que fue realizado cada aforo y la modalidad en que fue realizado.

En la tabla 3, se aprecian los resultados de las 8 mediciones: las realizadas en modalidad estática se calcularon por la ecuación 9, y las realizadas en modalidad dinámica se calcularon con la ecuación 26. Se aprecia que la incertidumbre durante la crecida es, en general, mayor en las mediciones dinámicas, por efectos provocados por la alta concentración de sedimentos en suspensión, y posiblemente su distribución vertical heterogénea, afectan en mayor medida a las mediciones en modalidad dinámica. En la figura 6 se puede apreciar el perfil de velocidades de uno de los transectas realizados bajo estas condiciones, la medición en modalidad dinámica presenta una estimación de incertidumbre de 36,3%, gran parte de la velocidad en la sección fue estimada por existir mala correlación de los 4 haces del instrumento. En las mediciones en modalidad estática, en general por tener mayor tiempo de exposición, la ecuación usada para el cálculo de incertidumbre da buenos resultados, pero hay que destacar que esta estimación de incertidumbre no considera que durante el tiempo de medición hubo fuertes variaciones de caudal y nivel del flujo (condiciones de flujo no

permanente).

Hora UTC	Nivel (m)	Caudal por curva de gasto VISCAT (m3/s)	Caudal Medio (m3/s)	Método de aforo	Desviación Standard	M	$2/\sqrt{M}$	$E_Q\%$
9:15	0,9055	30,486	25,923	Estático	N/A	11	N/A	7,5%
9:25	0,90875	30,734	30,77	Dinámico	4,36	3	1,15	14,3%
10:00	0,99275	38,596	37,004	Dinámico	3,55	3	1,15	11,1%
12:00	1,16215	55,723	52,748	Estático	N/A	18	N/A	6,1%
12:20	1,21381	60,295	56,946	Estático	N/A	20	N/A	5,6%
12:50	1,20914	59,86	60,345	Dinámico	0,36	4	1,00	36,3%
14:20	1,01502	40,962	38,921	Dinámico	0,10	6	0,82	7,8%
14:30	1,01223	40,687	38,349	Estático	N/A	13	N/A	7,1%

Tabla 3 Resultados con las estimaciones de incertidumbre

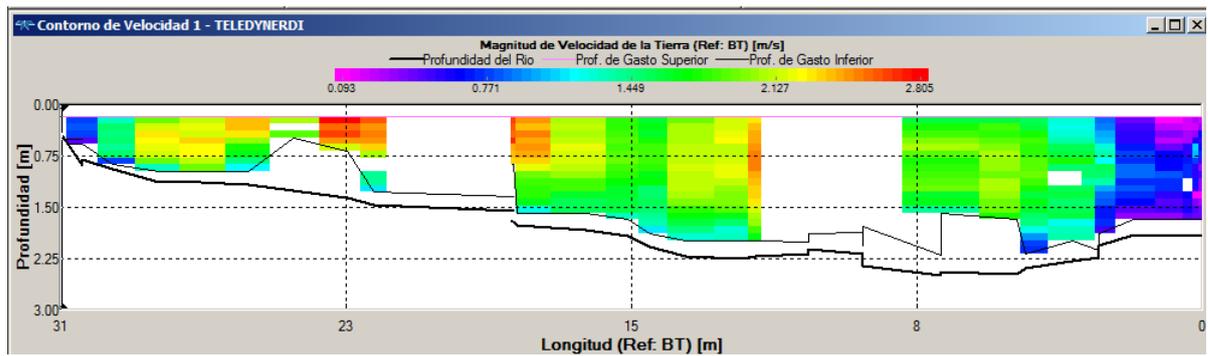


Figura 5. Perfil de velocidades del ADCP en modo estático durante la crecida, con alto transporte de sedimentos.

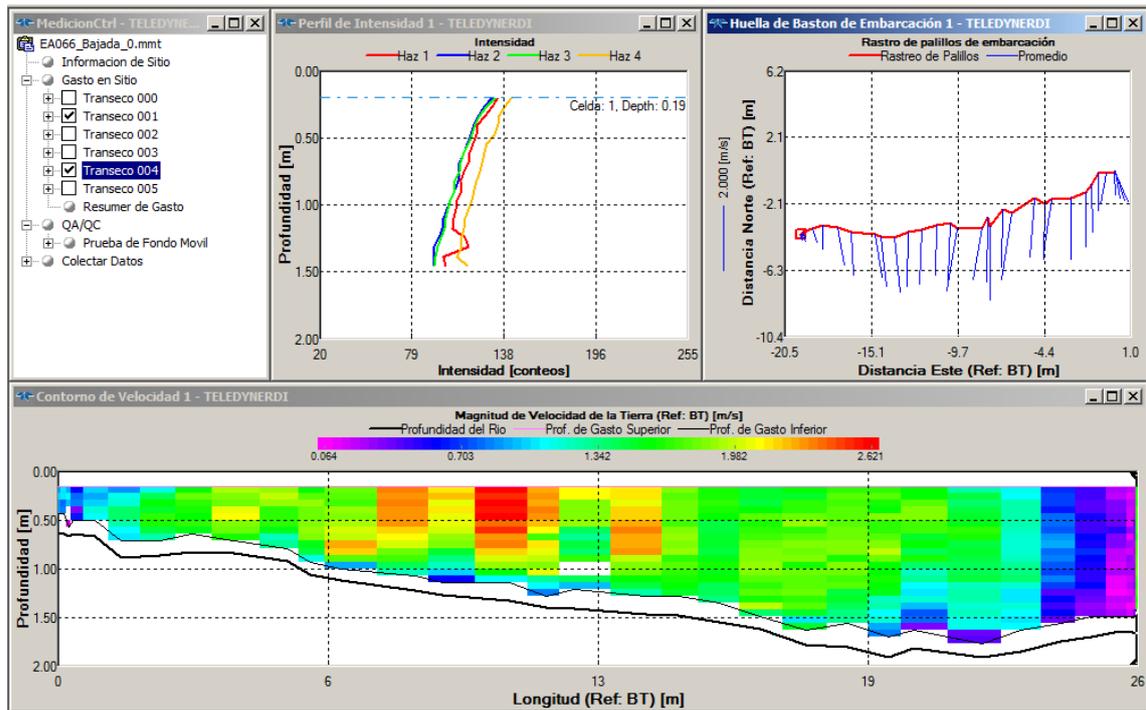


Figura 6 Perfil de velocidades para un aforo en modalidad dinámica, durante la recesión de la creciente, cuando la concentración de sedimentos había disminuido

La Figura 7, muestra el perfil de velocidades de la sección en modalidad dinámica en la medición realizada durante la recesión de la creciente, cuando la cantidad de sedimentos suspendidos descendió notablemente, se aprecia que el equipo da mejores resultados, midiendo casi en la totalidad de la sección, la ecuación usada para estimar la incertidumbre arroja un valor de 7,8%, un resultado más aceptable.

En la figura 8 se muestra la medición realizada en modalidad estática a la hora 12:00 UTC, este es el perfil típico de los resultados en todas las mediciones en esta modalidad, las velocidades máximas y mínimas en la sección coinciden en ambas modalidades, así como el lecho y el ancho coinciden con bastante grado de aceptación. En las mediciones dinámicas se observó mayor variación en la anchura total de la sección entre transectas consecutivas, pero los valores de velocidad también varían en estos casos compensando estos errores en el cálculo del caudal final, algo que concuerda con los principios de medición ya descritos del instrumento, donde la velocidad del agua depende de la velocidad del flotador, y a su vez la medida de la anchura depende de la velocidad del flotador.

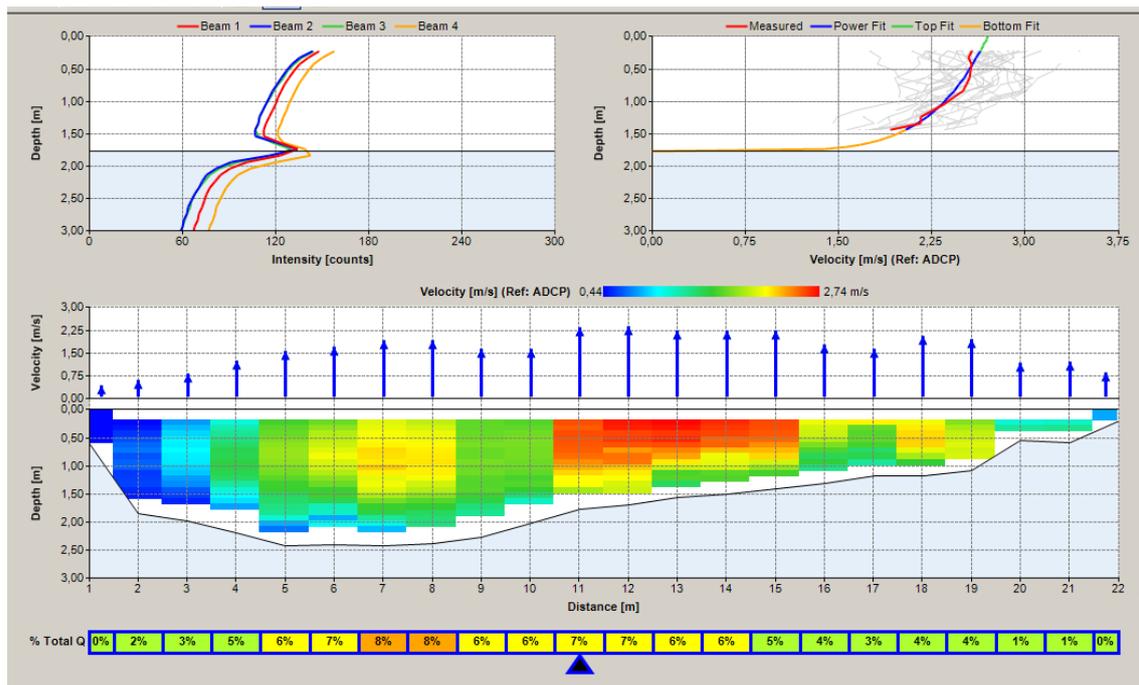


Figura 7 Perfil de velocidades por verticales del aforo con ADCP en modalidad estática.

En la figura 9, se puede apreciar la diferencia de turbidez en dos momentos distintos de la creciente, a la izquierda en el ascenso del hidrograma, a la derecha en la recesión.



Figura 8 Río Llobregat en la sección medida, a la izquierda durante la creciente con gran transporte de sedimentos, a la derecha en la recesión, se aprecia a simple vista como reduce la turbidez.

7 Conclusiones

Desde que se han comercializado los equipos ADCP para medidas de caudal, se ha intentado resolver el problema de estimar el grado de aceptación que tienen las mediciones realizadas con estos equipos, las complejidades físicas del funcionamiento del equipo han representado una serie de obstáculos por que complican la ley de propagación de incertidumbre al utilizar los parámetros que realmente mide (frecuencias e intensidades de ondas de sonido) para obtener, por medio de un algoritmo, lleno de complicados cálculos y suposiciones, las diferentes variables que definen el caudal, la velocidad del flujo y el área de la sección transversal al flujo.

Se ha realizado una investigación entre diferentes fuentes que han estudiado este problema. De ellas se han recopilado y expuesto los factores que están involucrados en la incertidumbre de medidas en modalidad dinámica. Comprendiendo bien los factores pueden diseñarse nuevos experimentos en campo, buscando eliminar o disminuir algunos, y al mismo tiempo, variar otros para intentar obtener tablas de calibración que puedan dirigir hacia soluciones empíricas análogas a las tablas propuestas por la ISO 748:2007 para medidas de caudal con molinetes.

Basado en los resultados obtenidos en las mediciones en campo, se pudo apreciar que en presencia de flujo con importante transporte de sedimentos y durante eventos de crecidas, el método en modalidad estática puede ser la alternativa que dé resultados más aceptables, siempre que no haya grandes cambios en el nivel durante la medición. En el momento de la recesión, cuando el transporte de sedimentos disminuye, la modalidad dinámica produce mejores resultados y es preferible ya que el tiempo de medición se reduce, disminuyendo los errores asociados a la no permanencia del flujo.

En contraste, las modalidades de medición de caudal con ADCP dinámica y estática presentan cada una ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones, tipología y características de la sección a medir. En resumen, la modalidad estática presenta ventajas por eliminar incertidumbres ocasionadas por la medición de la posición y el ancho de la sección. Las mediciones en esta modalidad se hacen mediante instrumentos convencionales de medida de distancia pero, por otro lado, requieren mayor tiempo de ejecución, tiempo en el que las condiciones del flujo pueden variar. En el caso de la modalidad dinámica, el tiempo de cada medición se reduce, pero se incluyen las incertidumbres provocadas por el sistema de medición de la posición y el

ancho de sección, medidas de forma automatizada por el instrumento, generando incertidumbres complejas de estimar y que requieren mayor profundidad en el estudio de los factores involucrados, así como la ejecución de más ensayos de campo con el fin de obtener resultados empíricos que logren mejorar el estudio de esta área.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten tomar decisiones en cuanto al momento adecuado y condiciones deseadas de una sección para realizar mediciones de caudal con ADCP durante avenidas.

8 Referencias Bibliográficas

Environment Canada, (2013), Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat, versión adapted for Water Survey of Canada, 62 p.

Gonzalez-Castro J A and Muste M (2007). Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis. J. Hydraulic Engineering, Vol. 133(12), 1390-1410.

González-Castro Juan A., Kevin Oberg, James J. Duncker (2000), Effect of Temporal Resolution on the Accuracy of ADCP Measurements, 9p.

Hening Huang, R.D. Instruments, Inc., (2008), Estimating Precision of Moving Boat ADCP Discharge Measurement, 12p.

Herschy, Reginald W. (2009), The magnitude of errors at flow measurement stations, 131p.

Herschy, R. (2009). Streamflow Measurement (3rd ed., p. 507). Abingdon, Oxon: Taylor & Francis.

Kyutae Lee, Hao-Che Ho, Muste Marian, Chun-Hung Wua, (2014), Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP, 15p.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), Reglamento Técnico de Hidrología, (2006), Vol 3, 122p.

R.D. Instruments, Inc., (2015),. sxs pro software user's guide, Vol. P/N 957-6260-00.

R.D. Instruments, Inc., (1989), Acoustic Doppler currentprofilers—Principles of operation. A practical primer: R.D. Instruments, San Diego, California, 36 p.

R.D. Instruments, Inc., (2011), Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer, Vol. P/N 951-6069-00, 62p.

Simpson Michael R., (2001), Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic

Doppler Current Profiler, 121p.

Tokyay T., Constantinescu C., Gonzalez-Castro Juan A., (2009), Investigation of Two Elemental Error Sources in Boat-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Measurements by Large Eddy Simulations, 13p.

US Geological Survey, Water Supply Paper number 2175, online available at: <http://water.usgs.gov/pubs/wsp/wsp2175/>, (1982).

US Geological Survey (2009), By David S. Mueller and Chad R. Wagner, Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat, Chapter 22 of Book 3, Section A, 84p.

ANEJOS

Agència Catalana de l'Aigua SERVEIS PER A LA REALITZACIÓ D'AFORAMENTS, CÀLCUL DE CABALS I ACTUALITZACIÓ DE CORRES DE CABALS PER A LA GESTIÓ DELS RECURSOS HIDRÍCS I EL CONTROL DELS CABALS DE MANTENIMENT I CONCESSIONALS OFITECO

INFORME DE L'AFORAMENT P-ACA-01/F03 - Rev. 1/Abr_19 Afo-190509- EA066 **INFORME EMÈS PER:** OFITECO **DESCRIPCIÓ DELS TREBALLS:** REALITZACIÓ D'AFORAMENTS I CÀLCUL DE CABALS Pàg. 1 de 3

CLIENT: ACA / PROPIETARI DEL PUNT DE CONTROL DEL TERRITORI

DADES GENERALS DE L'AFORAMENT		FOTOGRAFIES	
TIPUS DE TASCA:	Aforament	HORA INICI:	16:36
DATA:	09/05/2019	HORA FINAL:	16:55
NOM DE L'ESTACIÓ:	Berga	CODI ESTACIÓ:	EA066
RIU:	Liobregat	CONCA:	Liobregat
LOCALITZACIÓ PUNT D'AFORAMENT: (Coordenades UTM ETRS89)	X= 407241 Y= 4659812 Z= 490		
EQUIP D'AFORAMENT:	Fabio Nogueira, Boris González, Elena Rallo		
EQUIP DE MESURA:	ADCP Teledyne instruments nº 2100		
CODI HÈLIX:			
TIPUS CURS D'AIGUA:	Riu riu i riu		
MATERIAL MARGES / PARETS:	ME Roca i	MATERIAL LLIT / SOLERA:	Roca, pedra i terra
AMPLADA LLERA:	19,30 m	PROFUNDITAT MITJANA:	1,38 m
LECTURA ESCALA (I):	1,01 m	LECTURA ESCALA (I):	1,01 m
CABAL:	38.974 m³/s	±	m³/s
VELOCITAT MITJANA DE LA SECCIÓ:	1,43 m/s	TEMPERATURA MITJANA AIGUA	9
INCERTESA EXPANDIDA AL 95% DE NIVELL DE CONFIANÇA:	7,0%		
VARIABLES AUTOMÀTIQUES:			
Hora de les dades:	16:20	NIVELL:	101,18 cm
		CABAL:	40.962 m³/s

OBSERVACIONS

Relació del nivell de l'escala - aforaments a EA066

Distància de la secció d'aforament respecte a l'escala (m): 2100 m Aigua Aval

Observacions: Principi de la necessitat de la cresta. Aforament en estanc amb Trimara remolcat amb cordes, segons ISO 748:2009 a uns 10 metres aigua amunt del Pont Nou de l'Orniu de Cal Rosal, a falçada de l'antiga escala limnètrica. Es va calcular el temps de trànsit entre l'estació d'Oliván EA066 i el Pont Nou de Cal Rosal, el qual és de 19,2 min aproximadament, de manera que es col·loquen les escales inicial i final d'Oliván 20 min abans de l'hora d'inici i fi de l'aforament respectivament. El cabal que passa per l'estació d'Oliván és igual al cabal obtingut en l'aforament realitzat a Pont Nou (Q = 38,633m³/s) menys el cabal mitjà turbinat a la central hidroelèctrica d'Oliván per aquest interval de temps.

La creu vermella representa l'aforament del present informe. Les creus blaves són aforaments més antics. Les creus negres corresponen als aforaments fets per OFITECO durant el present contracte.

Afo - 190509 - EA066 - SA

Afo - 190509 - EA066 - AM

Afo - 190509 - EA066 - AV

Il·lustració A.1 Ficha del último aforo realizado ese día, puede apreciarse en la gráfica como caen los aforos en la curva de gastos, se eligió solo uno de los aforos en modalidad dinámica para ser presentados, el resto no dieron resultados satisfactorios.

Agència Catalana de l'Aigua SERVEIS PER A LA REALITZACIÓ D'AFORAMENTS, CÀLCUL DE CABALS I ACTUALITZACIÓ DE CORRES DE CABALS PER A LA GESTIÓ DELS RECURSOS HIDRÍCS I EL CONTROL DELS CABALS DE MANTENIMENT I CONCESSIONALS OFITECO

INFORME DE L'AFORAMENT P-ACA-01/F03 - Rev. 1/Abr_19 Afo-190509- EA066 **INFORME EMÈS PER:** OFITECO **DESCRIPCIÓ DELS TREBALLS:** REALITZACIÓ D'AFORAMENTS I CÀLCUL DE CABALS Pàg. 2 de 3

CLIENT: ACA / PROPIETARI DEL PUNT DE CONTROL DEL TERRITORI

CÀLCUL DE LA INCERTESA EN LA MESURA DE CABALS UNE-EN ISO 748:2009

Lloc de mesura i codi estació: EA066 Berga DATA: ju 09-05-19

	Incertesa	Valor	Tipus d'incertesa
Número de perfils verticals a la secció	m	13	un (%) 3,31%
Amplada de la secció	B (m)	19,30	us (%) 1,00%
Profunditat mitja (m)	H (m)	1,381	uo (%) 0,15%
Temps de mesura a cada punt (seg)	t (seg)	40	uu (%) 0,65%
Número de punts mesurats en el perfil vertical	n	10,0	up (%) 0,50%
Velocitat mitja de la secció (m/s)	V (m/s)	1,433	ue (%) 0,50%
			ue (%) 4,2%
			u(Q) (%) 3,5%
			k 2
			7,0%

Número límit de verticals (apartat E.6)

Sensibilitat, amplada i profunditat instrument mesura (apartat 9.3.2)

Mesura de l'amplada (apartat E.2)

Mesura de la profunditat (apartat E.3)

Número de punts mesurats en el perfil vertical (apartat E.4.2)

Calibratge de l'instrument (apartat E.4.3)

Temps límit d'exposició (apartat E.4.1)

Incertesa combinada

Factor de cobertura

Incertesa expandida al 95% de nivell de confiança

$$u(Q) = \left[u_m^2 + u_s^2 + \left(\sum_m \right) (u_b^2 + u_d^2 + u_p^2) + \left(\sum_n \right) (u_e^2 + u_t^2) \right]^{1/2}$$

CABAL MESURAT Q (m³/s) 38,974

Tipus d'instrument (Molinet = 1, Doppler o Electromagnètic = 2) 2

RESULTAT FINAL AFORAMENT (Inclou xifres significatives)
Q (m³/s)

Xifres significatives: 2 decimals

Nota: Si el valor en percentatge és inferior al 5%, posarem aquest valor pel càlcul de l'error.

7,0%

2,5/m³/s

Il·lustració A.2 Cálculo de incertidumbre según ISO 748 automatizado en la Hoja de aforos.

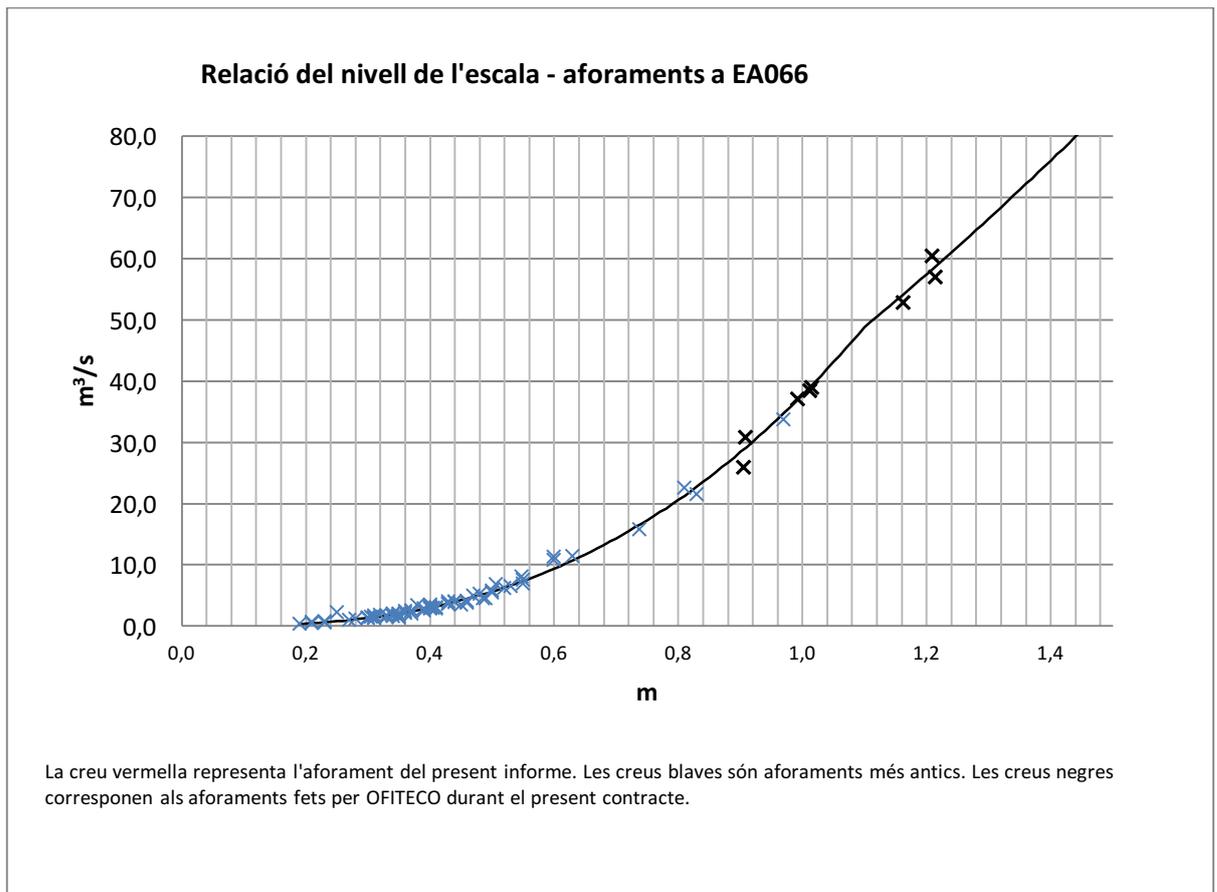


Gráfico A.1 Curva de gastos de la estación con los aforos históricos y en negro los 8 aforos realizados el 9/05/2019, en los que se basó este trabajo.