

Cálculo de incertidumbres en la medida de caudales en ríos y canales: herramientas y aplicaciones prácticas innovadoras

Jorge Helmbrecht¹, Jesús López², Juan José Villegas³

Water Idea¹, YACU², Agència Catalana de l'Aigua³

jh@wateridea.eu, jesus@yacu.es, jvillegas@gencat.cat

1 Resumen

Dos aspectos principales se tratan en el artículo: la metodología de aforos con la teoría del cálculo del caudal y de las incertidumbres, y la integración de estos aspectos en una aplicación práctica e innovadora desarrollada para la Agència Catalana de l'Aigua (en adelante ACA) denominada ERCAT, que permite estimar las incertidumbres asociadas al aforo y calcular los principales valores estadísticos para control de equipos.

La aplicación que se presenta permite integrar orígenes de datos diversos provenientes de instrumentos de medida en campo como molinetes, velocímetros *Doppler* o electromagnéticos, etc., y mediante el uso de la medición de caudal por el método de área-velocidad. Posibilita escoger entre diversas tipologías de cálculo y metodologías (completa o simplificada) y da como resultado las incertidumbres parciales y totales de la medida. Mediante una base de datos es posible almacenar toda la información para posteriormente hacer análisis estadístico de los resultados teniendo en cuenta diferentes parámetros como el instrumento, el sitio y fecha de medida, el equipo que hizo la medida, el caudal o la incertidumbre total. Asimismo, también es posible el posterior tratamiento de toda esta información y de la serie de datos, como el acoplamiento de las incertidumbres en las curvas de gasto.

2 Introducción y objetivos

El cálculo de la incertidumbre en la medición de magnitudes es un tema muy estudiado desde diferentes campos de la ciencia, como la metrología, la estadística o, en el caso del agua, en la hidrometría. Sin embargo, su uso y aplicación es más común en la industria mecánica, eléctrica, química, etc., que en la hidrometría. Es habitual hablar de incertidumbre y de precisión en medidas de longitud, de peso, incluso de velocidad en radares para coches, pero no tanto en el mundo de la hidrología en lo que a sus usos prácticos se refiere. Desde hace algo más de 30 años, algunas instituciones han sido pioneras en el cálculo de las incertidumbres asociadas a la medida de caudales en ríos, comenzando con la referencia de las investigaciones de R.W. Herschy en Gran Bretaña hasta llegar al desarrollo de normativas ISO y UNE traducidas al español en su última versión de 2001. Si bien las bases metodológicas generales para el cálculo de la incertidumbre ya están sentadas, no se había realizado en España hasta ahora su aplicación concreta, adaptación al medio, a las herramientas y tipologías de ríos de nuestro país, así como la sistematización de su cálculo integrado tanto a la medida misma del caudal en el río, como su posterior propagación sobre la curva de gasto.

Las aplicaciones prácticas de dichos cálculos son variadas y dependen del uso final de las medidas de caudal realizadas, ya sean medidas puntuales para el ajuste y calibración de otros sensores automáticos o de curvas de gasto, como la constatación puntual de un valor fiable de caudal para temas administrativos o legales. Concretamente la ACA, viene aplicando desde hace algún tiempo la incertidumbre en sus medidas para la realización de inspecciones de campo y registro de caudales.

Otro aspecto muy importante es conocer la calidad de los datos con los que se trabaja en hidrometría y que posteriormente son la base tanto para la gestión del recurso, como para estudios de planificación hídrica, de caudales de mantenimiento, determinación de zonas inundables, etc. Usualmente la medida de grandes caudales en avenidas, así como la de caudales muy pequeños en sequías, suele comportar incertidumbres mayores que la medida de caudales en normalidad. Justamente es a partir de estos caudales extremos por exceso (avenidas) o por defecto (sequías) donde se toman decisiones importantes (con consecuencias económicas, sociales y ambientales) como por ejemplo el período de retorno correspondiente a una inundación que ha afectado una zona determinada o el caudal mínimo ambiental o de continuidad fluvial de un río. Es por ello que conocer cuál es el grado de incertidumbre en las medidas y la calidad de los datos utilizados pasa a tener un papel relevante.

La determinación de la incertidumbre de las medidas, así como de otros parámetros del cálculo, sirven de apoyo y contraste para valorar la calidad de la propia medición así como de los equipos y personal de trabajo de campo, y también para determinar posibles desviaciones de los datos, errores espurios, o simplemente el fallo de instrumentos de medida, entre otros.

En definitiva, el objetivo principal es conocer la incertidumbre de la medida de caudal y así poder establecer si dicho caudal se encuentra dentro de un cierto rango con un determinado nivel de confianza. Mediante este objetivo, es posible conocer y mejorar la calidad de los datos, dar fiabilidad y garantías sobre los valores que se miden, controlar indirectamente el proceso de toma de datos y el mantenimiento de equipos e instrumentos de aforo, entre otros. También es posible fomentar en los técnicos aforadores la idea de “calidad del dato” por encima de “cantidad de datos medidos”, mejorando a la vez la eficiencia en las medidas, el tiempo asociado y la calidad de los resultados. En todo caso, se busca la obtención de un dato de caudal con calidad asegurada dentro de un rango predeterminado por los Manuales del Servicio de Hidrología de la ACA.

Para lograr dichos objetivos es necesario, además del conocimiento de las metodologías de cálculo utilizando aplicaciones a medida como ERCAT (que se describe más adelante), la adaptabilidad de los procedimientos de trabajo y metodologías de cálculo y parámetros asociados, a cada territorio, tipo de cuenca y río, idiosincrasia de los equipos de campo, instrumentos, herramientas previas existentes, etc.

3 Metodología de aforo

3.1 Conceptos básicos

La medida del caudal de un río o canal puede realizarse por diferentes metodologías (*Helmbrecht et al., 2004*) aunque la más utilizada es el método Área-Velocidad que consiste en la determinación del área de la sección transversal (A) y de la velocidad media del flujo (V_m), obteniéndose el caudal como el producto de ambas magnitudes. Dado que la distribución espacial de las velocidades en la sección transversal suele ser desconocida (especialmente en secciones naturales), para obtener la velocidad media de la sección V_m es necesario discretizar la sección completa en áreas de menor tamaño, concretamente en franjas verticales, donde se supone que el perfil de velocidad vertical es constante a lo ancho de la franja. Cada franja puede definirse como el área entre dos perfiles de velocidad sucesivos, o como el área centrada en cada perfil de velocidad equidistante a los perfiles adyacentes. Concretamente durante el aforo deben medirse las siguientes magnitudes que posteriormente influirán en el cálculo de la incertidumbre: 1) anchura total, 2) anchura de cada franja, 3) profundidad de cada perfil vertical, y 4) diversas velocidades puntuales en cada perfil vertical.

Dependiendo del tipo de río o canal, la medida puede realizarse atravesando el río (por vadeo), desde una pasarela sobre un canal con la ayuda de barras, desde un cable suspendido en una estación permanente, desde un puente con un torno o desde un bote. Tanto el tramo como la sección de medida debe cumplir con una serie de requisitos que permitan considerar como válidas las hipótesis de cálculo (*ACA, 2004*). Igualmente existen diversas recomendaciones (*ACA, 2004; ISO748, 2001*) sobre la cantidad de franjas verticales (con profundidades y/o perfiles verticales de velocidad), distancias entre franjas, cantidad y ubicación de los puntos de medida de velocidad en cada vertical, tiempo de medida, repetición de las medidas, etc., todo en función del tipo de curso de agua (regularidad, anchura, profundidad, rugosidad, existencia de vegetación, etc.), del caudal a medir (estiaje, normalidad o avenidas, con o sin transporte sólido significativo, etc.), del instrumento y metodología concreta a emplear, del equipo de campo y la formación del personal asignado, del objetivo del aforo y el grado de exactitud deseado, entre muchos otros. La descripción de estos aspectos y las posibles variantes durante las mediciones, no es objeto de este artículo pero pueden revisarse en el Manual de Aforos (*ACA, 2004*, actualmente en revisión) o en la bibliografía especializada en hidrometría y diversas normativas ISO. A continuación se hará una breve descripción de los aspectos más destacados de la metodología de aforos.

3.2 Medida de la anchura total y parcial

La medida de la anchura total del canal o río, y la de los segmentos individuales, se obtiene mediante la medida (con cinta u otra metodología si el cauce es muy ancho) de la distancia horizontal desde un punto de referencia fijo en la margen ubicado en el plano de la sección transversal. En lo posible, la anchura total debe medirse entre ambas márgenes y no por la acumulación de medidas parciales.

3.3 Medida de la profundidad

En secciones irregulares la medida de la profundidad debe hacerse a intervalos reducidos para definir correctamente el área hidráulica de cursos de agua. La exactitud de la medida de caudal aumenta significativamente (especialmente en secciones irregulares, pero no necesariamente en secciones muy regulares) si se disminuye la distancia de separación entre los intervalos de medida. Por ejemplo la norma ISO748 recomienda utilizar una separación máxima entre medidas de profundidad de 1/20 de la anchura total de la sección (es decir un mínimo de 19 medidas). Sin embargo esta recomendación ha sido establecida para ríos anchos y secciones muy irregulares, y puede disminuirse la cantidad de medidas de profundidad en secciones más estrechas y regulares, llegando incluso al extremo de medir una sola profundidad si la sección fuera perfectamente rectangular. En cualquier caso, la separación entre los puntos de medida de la profundidad debe hacerse de manera que queden representadas las variaciones de la sección transversal y las irregularidades del lecho. En los casos en que la medición no se realiza por vadeo, es recomendable utilizar aparatos de sondeo por ultrasonido para detectar con detalle la posición y forma del fondo, disminuyendo así la incertidumbre asociada.

3.4 Determinación del área de la sección transversal

La determinación del área de la sección transversal es la consecuencia de la medición de las profundidades en cada perfil vertical y de las distancias parciales entre perfiles. Suponiendo una variación lineal entre las diferentes profundidades medidas, se obtiene la forma de cada franja y por tanto el área. Eventualmente, ya sea para reducir el tiempo total del aforo (midiendo menos perfiles de velocidad) o para disminuir el error de la medida de la sección transversal, se pueden tomar más medidas de profundidad (conocer mejor la forma del lecho) que de velocidad. En todo caso, lo más eficiente (desde el punto de vista del esfuerzo asociado) suele ser la experiencia del técnico aforador que identifique correctamente los cambios significativos de profundidad del lecho intentando medir profundidades en todas estas “discontinuidades” del perfil del fondo, aunque la anchura de las franjas no sea constante. Es decir que la solución de aumentar indiscriminadamente la cantidad de perfiles verticales puede ser correcta pero no es demasiado eficiente y a veces no es nada práctica, especialmente cuando el tiempo total del aforo está acotado (por ejemplo por posibles variaciones u oscilaciones del caudal, o simplemente por temas de costes).

3.5 Medida de la velocidad puntual

La posición y la cantidad de franjas en la cuales se divide la sección de aforo para medir perfiles de velocidad, está en función de la anchura, forma y regularidad de la sección, la variabilidad del flujo o oscilación del nivel de agua, duración del aforo, rugosidad e irregularidad del fondo (existencia de vegetación, piedras, obstáculos, posibilidad de erosión, etc.), entre muchos otros. El criterio (*ISO748, 2001*) generalmente utilizado —aunque poco práctico para su uso en campo— es que la cantidad de franjas verticales donde se mide la velocidad, debe ser tal que el caudal en cada una de ellas no supere el 10% del caudal total a medir, como forma orientativa e indicadora de la calidad del aforo.

Para realizar la medida de la velocidad es necesario que el eje horizontal del instrumento sea paralelo a la dirección del flujo, asegurando que la velocidad medida sea la de la dirección principal del flujo y no haya influencia de ninguna componente de la velocidad en el plano de la sección transversal. Otro aspecto importante es que el flujo no se vea afectado por ninguna perturbación durante el proceso de medida, por ejemplo por la posición de la persona que mide dentro del río o de cualquier obstáculo en el agua (ramas, piedras, oscilación del nivel, presencia de vórtices o flujos negativos cerca de las márgenes, etc.). Estos aspectos (que conforman los errores espurios) influyen enormemente en la calidad del aforo, siendo la formación adecuada de los técnicos y la utilización de procedimientos y protocolos detallados de trabajo, la mejor herramienta para prevenirlos.

4 Cálculo del aforo

Existen diversas metodologías de cálculo del aforo por el método área-velocidad, según como se considere el promedio de las velocidades en cada franja, las aproximaciones que se hagan para el lecho y las márgenes, la cantidad de puntos medidos en cada vertical o la metodología para la integración de las velocidades, entre otros. A continuación se describen los métodos más utilizados, donde V_i es la velocidad promedio en cada perfil i , h_i es el calado en el perfil i y $b_{i,i+1}$ es la anchura de la franja entre los perfiles de velocidad i e $i+1$ (ver figura 1).

4.1 Método de la sección media

Este método (ISO748, 2001), también es llamado “Mean-Section Method”, “Simple Average Method” o “Sección Media” (OMM, 1994). El caudal parcial en cada franja o panel es igual al producto del promedio de velocidades por el promedio de los calados de dos perfiles consecutivos (en los extremos de la franja) por la distancia entre perfiles o ancho de franja (ver figura 1). El caudal total se obtiene a partir de la suma de los caudales parciales.

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{V_i + V_{i+1}}{2} \right) \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) b_{i, i+1}$$

Dado que en el punto $i=1$ los calados y las velocidades son nulos, la primera franja (entre 1 y 2), tendrá un caudal parcial igual a:

$$q_{1,2} = (V_2 / 2) (h_2 / 2) b_{1,2}$$

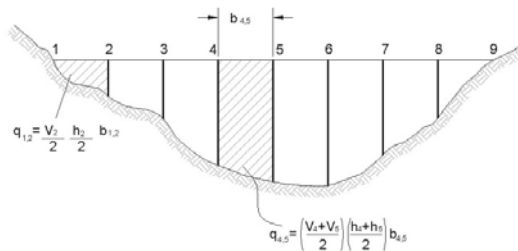


Figura 1 Definición de variables del método de la sección media

Lo mismo para en la última franja de la sección, debido a que la velocidad y el calado del último punto ($i=n$) son nulos. La hipótesis es que la velocidad y el calado disminuyen linealmente hasta cero con la distancia a los márgenes. Se deberá comprobar en el campo si la realidad difiere mucho de esa hipótesis, si es así se realizarán las modificaciones en los caudales parciales de las franjas extremas.

4.2 Método de la sección central

Este método (ISO748, 2001), también es conocido como “Midsection Method” (Herschy, 1978) o “Semisección” (OMM, 1994). El caudal parcial q no se calcula para cada franja entre perfiles de velocidad, sino para un área entre los centros de las franjas (ver figura 2). El caudal parcial q se obtiene como el producto del área del perfil de velocidad $f v_i$ (velocidad media por el calado en el perfil i) por el “ancho de influencia” de este perfil, que se calcula como la distancia entre centros de franjas contiguas (o también el término medio de las distancias a los perfiles contenidos).

$$Q = \sum_{i=2}^{n-1} V_i h_i \left(\frac{b_{i-1,i} + b_{i,i+1}}{2} \right)$$

Se observa que en los extremos (para $i = 1$ y $i = n$) el calado es cero (la sumatoria va desde $i = 2$ hasta $i = n-1$) por lo que se infravalora el caudal parcial q_1 y q_n que circula en las áreas comprendidas entre el centro de la primera (o última) franja y el margen. Evidentemente, si la velocidad en estas franjas es muy baja o las franjas tienen una área pequeña, el error en el caudal total será pequeño. En caso contrario, se considerará alguna aproximación para estos caudales.

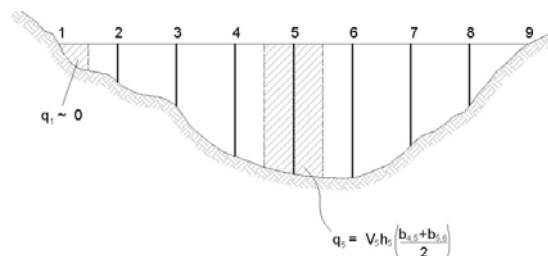


Figura 2 Definición de variables del método de la sección central

4.3 Cálculo de la velocidad media de cada perfil

La velocidad media de cada perfil vertical se obtiene por diversos métodos muy extendidos en hidrometría (*OMM, 1994; ISO748, 2001*) como la medición puntual de la velocidad a 0,6 de la profundidad, a 0,2 y 0,8, o midiendo a diversos intervalos en la vertical e integrando el perfil, entre muchos otros (*ACA, 2004*). Las mediciones de velocidad puntuales pueden realizarse mediante diferentes instrumentos como molinetes, velocímetros acústicos Doppler, velocímetros electromagnéticos, etc., aunque también pueden realizarse mediante un perfilador Doppler (ADCP) que mide simultáneamente muchas velocidades en una misma vertical. Los métodos de integración del perfil de velocidades también pueden ser variados, como por ejemplo la regla parabólica de Simpson, o cualquier otra integración matemática de la curva velocidad-calado.

A pesar de la existencia de diversas formas relativamente simples de calcular la velocidad media de cada perfil, dichas metodologías están fuertemente ligadas al procedimiento de medición en campo y a las condiciones del lecho y las márgenes, que es lo que la mayoría de manuales y normas dejan totalmente a criterio del técnico aforador. En este aspecto (en la elección de cuantas velocidades puntuales y a que profundidades se medirá y su correspondiente relación con el posterior método de cálculo) no se ha profundizado en detalle en la normativa y manuales existentes hasta ahora, ni tampoco en cómo afecta a los errores finales de la medida. La realidad de cada río, riera y curso de agua, así como sus condiciones aptas para la medición, varía de un territorio a otro y por lo tanto es difícil preestablecer un único método para la medición de las velocidades y posterior cálculo de la velocidad media de cada perfil. Por ejemplo el método más extendido, que es el de un punto de medida a 0,6 de la profundidad (60% de la profundidad), sólo es correcto en lechos con poca vegetación y sin la presencia de obstáculos, y donde el instrumento que se utilice pueda ser introducido a dicha profundidad (es decir tiene que haber suficiente calado, lo que en muchas rieras y pequeños cursos catalanes no siempre ocurre). Debido a estos inconvenientes, es muy común que durante los aforos se realicen medidas de velocidad a profundidades no estándares (diferentes de 60%, 20%, 80%, etc. de la profundidad) y por lo tanto deban utilizarse metodologías especialmente adaptadas para la integración del perfil de velocidades dentro del método de cálculo del aforo.

Otro aspecto que no suele definirse con claridad en los diferentes manuales, normativas y programas de cálculo es el cálculo de la velocidad del flujo cercana al fondo para la integración del perfil. Algunos métodos proponen la utilización de un factor de reducción de la velocidad (respecto de la velocidad medida más cercana al fondo) en función del tipo de lecho, su rugosidad y presencia de vegetación u obstáculos, otros proponen una ley de decrecimiento potencial ($1/6$) o un decrecimiento lineal y en otros casos se propone un porcentaje fijo de la velocidad medida. Estos aspectos pueden influir en mayor o menor grado en el resultado del aforo en función de la ubicación de la medida de velocidad más cercana al fondo, del calado total, de la presencia de vegetación, etc., y por lo tanto deben controlarse para poder determinar el grado de incertidumbre en el cálculo del caudal.

El programa de cálculo ERCAT, precisamente hace hincapié en la posibilidad de realizar el cálculo de la velocidad media del perfil, ya sea mediante los métodos tradicionales (1, 2, 3 o más puntos) o bien con una integración simple por tramos que es totalmente reproducible en sus pasos y forma de cálculo, así como la posibilidad de definir el criterio de cálculo para la definición de la velocidad del flujo cercana al lecho para realizar la integración o la velocidad en las márgenes. Todos estos aspectos que no se calculan directamente en la metodología para la determinación de la incertidumbre (*ISO748, 2001*) deben ser tenidos en cuenta a la hora de hacer el cálculo del aforo porque influyen en el error final de la medida de caudal.

5 La incertidumbre en los aforos

La incertidumbre de la medición de caudales ha sido extensamente tratada en la bibliografía específica, tanto en manuales de hidrometría, como en normas ISO (por ej. 748, 5168, etc.), pero en la mayoría de los casos desde un punto de vista muy teórico y sin aplicaciones concretas (excepto por los ejemplos pioneros de R.W. Herschy en la década del 70). La falta de aplicación y ejemplos concretos, es especialmente importante si además se tiene en cuenta las diversas formas de cálculo y metodologías para aforar, así como la diversidad de cauces y condiciones particulares e idiosincrasia de cada territorio y sus técnicos. En un curso de agua o canal, en general no es posible determinar el error de la medida exactamente, pero pueden hacerse análisis de las mediciones individuales que son requeridas para obtener el caudal y hacerse estimaciones estadísticas de la probable magnitud del error. La estimación estadística de la magnitud del error se denomina incertidumbre de la medición. A pesar de esta diferenciación estricta, suelen confundirse en muchos casos en el uso coloquial o práctico la terminología “incertidumbre” con la de “error” del caudal medido.

En general las fuentes de incertidumbre para aforos en cursos de agua están relacionadas a la medida de la anchura, de la profundidad, a la determinación de la velocidad puntual y de la velocidad media, y se clasifican de la siguiente forma:

Incertidumbre Sistemática: debidos a errores del equipo normalizado de medida (ocasionado cuando el instrumento está mal calibrado o no está ajustado a un patrón conocido). No se ve afectado por la repetición de medidas, y únicamente se puede reducir utilizando en las mediciones equipos más precisos (no es posible reducirlos aumentando el número de mediciones). La magnitud de la incertidumbre es constante o varía según una ley conocida. Se consideran los siguientes valores estimativos para condiciones normales pero que pueden modificarse en función del tipo de aforo, instrumento utilizado y curso de agua:

La incertidumbre en la medida del ancho (e''_b) igual a 0,5%, la incertidumbre en la medida del calado (e''_h) igual a 0,5% y la incertidumbre debido a la calibración del instrumento (e''_i) igual a 1% (ISO748, 2001).

Incertidumbre Aleatoria: relacionado con la dispersión de las mediciones inherentes al fenómeno físico. La magnitud de estos errores varía de forma imprevisible cuando se repiten medidas en condiciones idénticas y se reduce repitiendo varias veces la misma prueba en condiciones iguales. En principio, se puede considerar que se pueden ajustar a una distribución normal. Se tienen en cuenta la incertidumbre en la medida del ancho (e'_b), la incertidumbre en la medida del calado (e'_h), la incertidumbre asociada al número de verticales utilizadas en el aforo (e'_n), la incertidumbre asociada al número de puntos de medida de la velocidad en cada vertical (e'_p), la incertidumbre debido al tiempo de medición de la velocidad (e'_t) y la incertidumbre debido a la calibración del instrumento de medida (e'_i).

En la aplicación ERCAT, los errores aleatorios se calculan a través de funciones que representan las ecuaciones de ajuste a los valores tabulados en la ISO 748 y en las publicaciones de Herschy. La incertidumbre total se determina combinando la incertidumbre sistemática total (e''_Q) y la incertidumbre aleatoria total (e'_Q):

$$e_Q = \pm [e''_Q{}^2 + e'_Q{}^2]^{1/2}$$

La incertidumbre aleatoria puede calcularse con el método completo (izquierda) analizando cada perfil o mediante un método simplificado suponiendo que los errores aleatorios son similares en cada franja (derecha):

$$e'_Q = \pm \left[e_n^2 + \frac{\sum_{i=1}^n [(b \cdot h \cdot V)^2 (e_b^2 + e_h^2 + e_t^2 + e_p^2 + e_i^2)]}{\left(\sum_{i=1}^n b \cdot h \cdot V \right)^2} \right]^{1/2} \quad e'_Q = \pm \left[e_n^2 + \frac{1}{n} (e_b^2 + e_h^2 + e_t^2 + e_p^2 + e_i^2) \right]^{1/2}$$

La incertidumbre sistemática se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$e''_Q = \pm [e''_b{}^2 + e''_h{}^2 + e''_i{}^2]^{1/2}$$

Más detalles de estas ecuaciones y su obtención pueden encontrarse en *Helmbrecht (2004)* y en *ACA (2003)*. Se destaca claramente la gran importancia relativa en el cálculo de la incertidumbre de la cantidad de perfiles verticales medidos (o sea la cantidad de franjas) que tiene un peso más importante que, por ejemplo, la cantidad de puntos de velocidad medidos en una vertical. Es decir que para disminuir la incertidumbre, es más importante medir más perfiles verticales (con profundidades y velocidades) que pocos perfiles pero con muchas velocidades puntuales en cada vertical. Por eso, en las normativas internacionales, suele recomendarse la utilización de 20 franjas en un aforo, aunque está claro que esta cantidad dependerá de la forma, tipología, regularidad, etc. del curso de agua a medir. El método completo para el cálculo del error requiere que el error se calcule junto con el cálculo del aforo, o al menos conociendo todas las variables intermedias del cálculo. Finalmente cabe destacar que gran parte de los errores (especialmente los espurios) pueden eliminarse con las siguientes medidas: personal con experiencia y debidamente formado, utilización de un manual de procedimientos detallado (desde la elección del lugar hasta el cálculo detallado), mantenimiento periódico del lugar de medida, del instrumental y de los accesorios, y revisión de los datos siguiendo procedimientos estándar de calidad.

6 Aplicación para el cálculo de la incertidumbre

La herramienta que se presenta se denomina **ERCAT** (en catalán “*Eina de Recerca i Coneixement d'Aforaments al Territori*”, es decir Herramienta de Investigación y Conocimiento de Aforos en el Territorio) y fue desarrollada para la ACA permitiendo, de forma sintética lo siguiente:

- cálculo de aforos directos mediante diversos tipos de instrumentos (molinete, Doppler, electromagnético, ADCP, etc.) y con diversas metodologías según los manuales del ACA,
- cálculo de las incertidumbres parciales y totales con el método simplificado o completo,
- cálculo de las curvas de gasto (en sus diferentes tipologías y mediante regresiones, puntos *dummy*, forzado por un punto, extrapolación, curvas históricas, recuperación de ajustes, etc.) y la representación de las bandas de confianza asociadas a las incertidumbres mencionadas,
- cálculo de índices y estadísticas relacionadas al aforo, equipos e instrumentos,
- disponibilidad de base de datos que incorpora toda la información, gráficos y cálculos parciales,
- diseño en entorno .NET con la posibilidad de funcionar en red y con diversos permisos de entrada

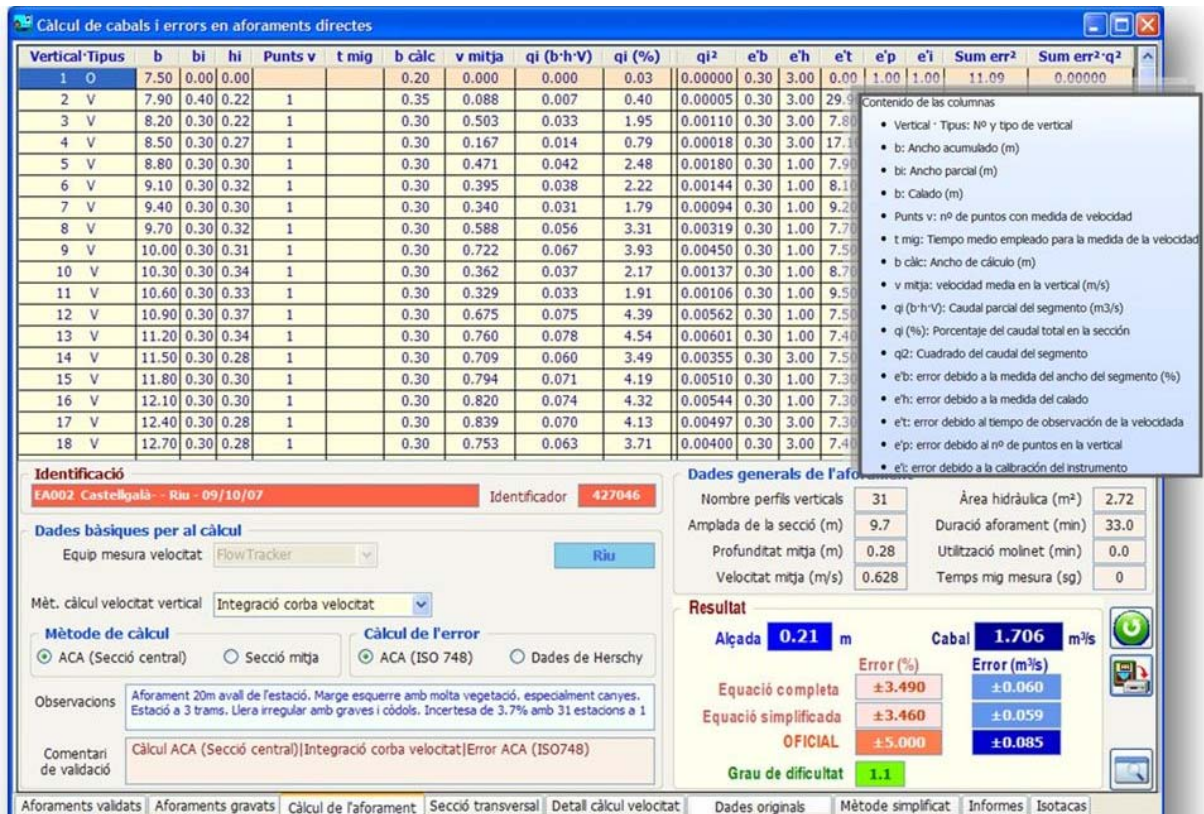
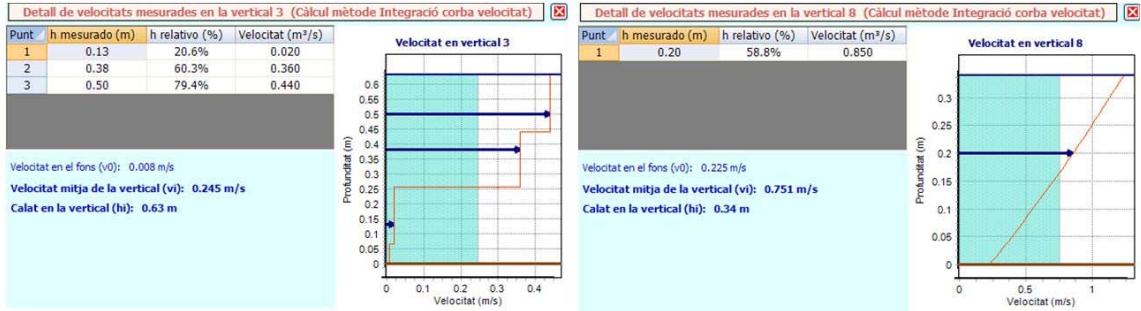


Figura 3 Arriba: Perfiles verticales de velocidad calculados, así como la media y los porcentajes de profundidad. Abajo: Pantalla con las variables para el cálculo del aforo y el cálculo del error asociado

ERCAT graba los datos de campo procedentes de fuentes diversas en ficheros de aforo con formato único y estándar, que manejan todos los datos registrados en campo, e incluso los resultados del aforo de instrumentos totalizadores con sus diferentes variables (como los que tienen *datalogger* incorporado). Se ingresa mediante un nombre de usuario y contraseña, que está adaptado con 3 perfiles: usuario estándar (sólo puede ver resultados de aforos validados), usuario medio (puede ver todos los aforos, incluso los que no están validados, pero no puede editar) y usuario experto (puede escribir en la Base de Datos, editar, validar, modificar parámetros, etc.).

La herramienta muestra de forma gráfica y numérica las velocidades medidas y la velocidad media obtenida, así como la ubicación de las velocidades puntuales medidas en la vertical del perfil (figura 3). También se muestra en formato de tabla el resumen de las principales variables del cálculo del aforo directo con las opciones seleccionadas incluyendo el cálculo del error del aforo, donde se observan los valores para cada vertical (anchura, profundidad, cantidad de puntos medidos, tiempo de medición, velocidad media, etc.) así como el caudal que pasa por cada franja y su porcentaje respecto del total, y los errores parciales aleatorios y sistemáticos del método completo.

En otras pestañas se observan los datos ya grabados en la base de datos, las secciones transversales, el detalle del cálculo de las velocidades, los resultados del método simplificado, los informes predefinidos y los gráficos de isotacas.

El gráfico de los datos de aforo permitirá visualizar: la sección transversal incluyendo el fondo del cauce y la superficie, los vectores velocidad origen del aforo, la velocidad media obtenida en las verticales, las líneas de igual velocidad (isotacas) y el porcentaje del caudal que atraviesa cada sección de cálculo. Se observa en la figura 4 la representación que se realiza de la sección transversal del cauce, los perfiles verticales aforados, la ubicación y magnitud de los vectores de velocidad puntual y, para cada franja, una línea naranja indicando el porcentaje de caudal parcial y la línea punteada mostrando la curva de velocidades medias.

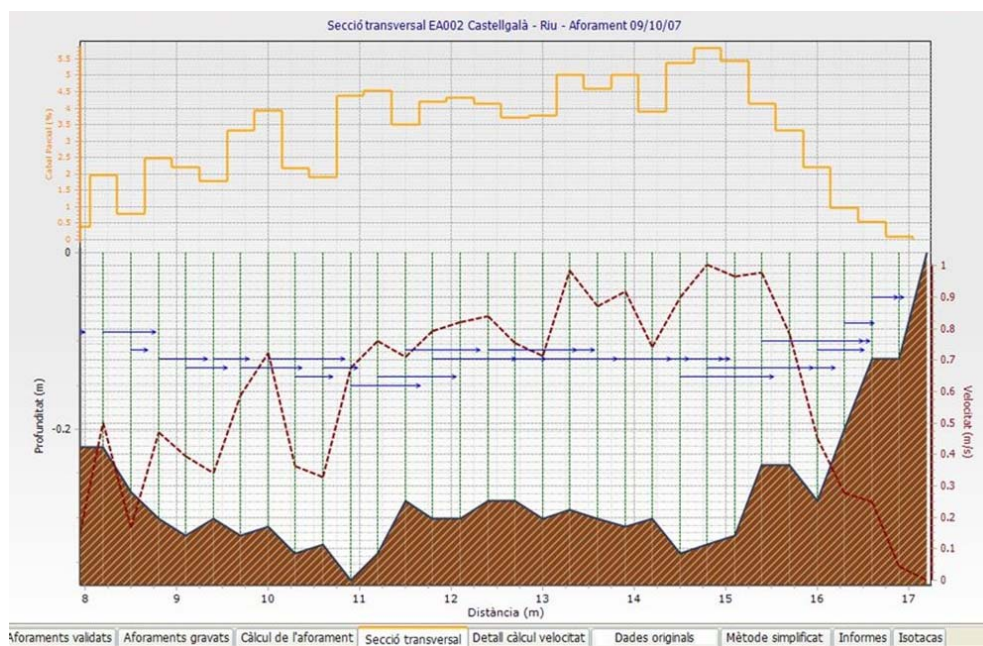


Figura 4 Sección transversal, perfiles verticales, vectores velocidad, % de caudal y curva de velocidades

La herramienta gestiona para el cálculo una base de equipos de aforo con sus características y ecuaciones. La base de datos contiene los parámetros de calibración que permiten calcular automáticamente las velocidades a partir de los datos de campo (revoluciones). Dicha base de datos almacena también las coordenadas de la sección de cada aforo, las observaciones efectuadas durante el aforo, el instrumento, el nombre del equipo que aforó, la fecha, códigos, resultados parciales, etc.

Cabe destacar que la metodología de cálculo tiene en cuenta las aproximaciones de rugosidad tanto del fondo del cauce como de las márgenes, así como las diferencias en el cálculo a la hora de aforar una sección natural irregular o una sección artificial y muy regular como un canal de riego o hidroeléctrico.

La utilización del cálculo del error permite cuantificar la bondad del aforo así como de los cálculos realizados y descartar a priori o seleccionar como bueno un aforo para integrar la curva H-Q. El módulo de creación y gestión de curvas de gasto, tiene incorporado la opción de bandas de confianza (figura 5 arriba).

La aplicación ERCAT dispone de un módulo capaz de realizar estadísticas sobre una selección de los aforos realizados, elegidos por tiempo, por instrumento o por equipo de aforo. Se grafican las incertidumbres en dicho período y para las medidas seleccionadas, contra el caudal o el producto caudal por velocidad (figura 5).

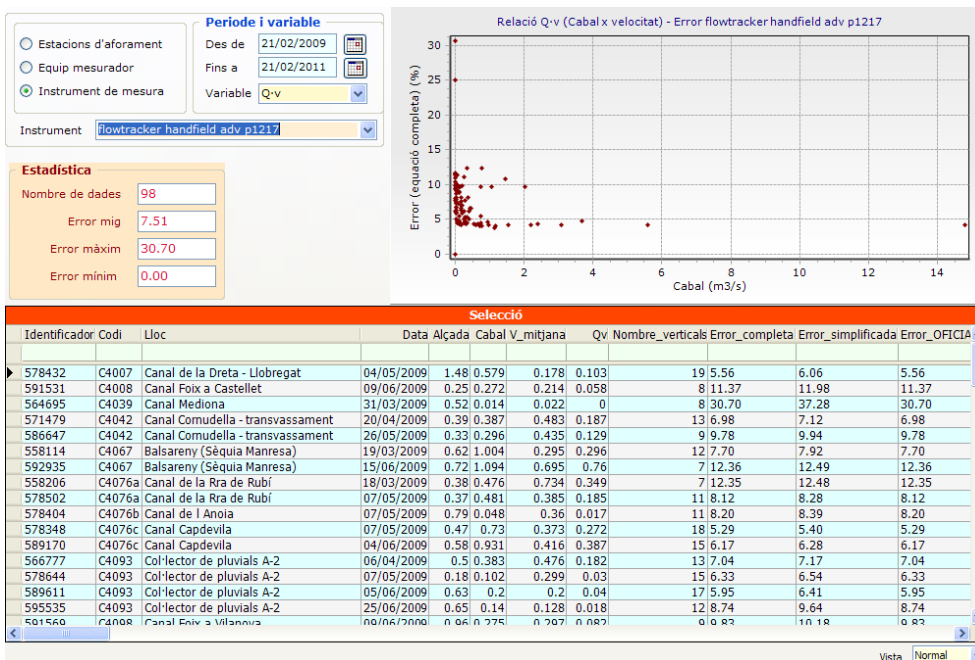
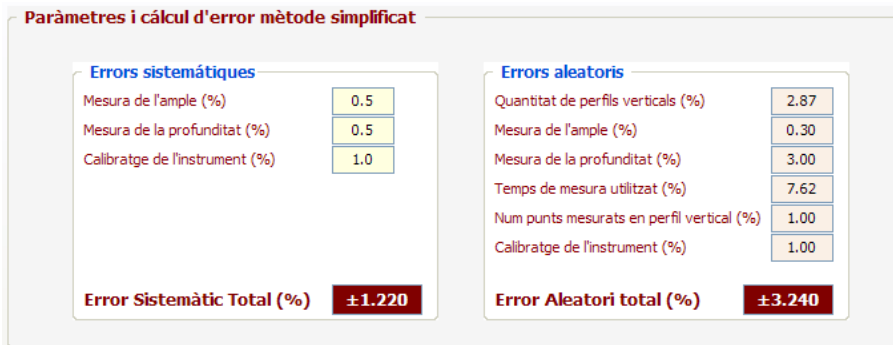
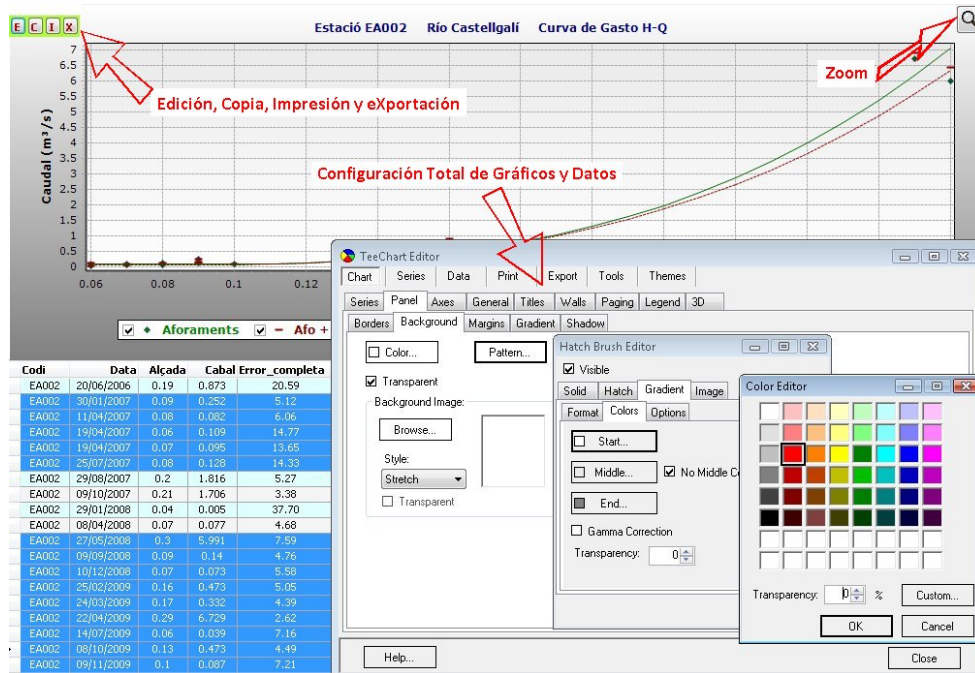


Figura 5 Arriba: Gestor de curvas de gasto configurable. Medio: Resultados del cálculo del error por el método simplificado. Abajo: Estadísticas de errores por equipos, instrumentos, punto de control y fecha.

La estadística permite comprobar si la fiabilidad de un equipo técnico o humano permanece estable en el tiempo a través de la comprobación del error en función del caudal o del producto caudal por velocidad. Dicho indicador (el producto de la velocidad media del aforo por el caudal total medido $V \times Q$) permite evaluar el “grado de dificultad” del aforo, de forma que pueda establecerse si la incertidumbre asociada a la medida es aceptable o no. Por ejemplo un aforo con un caudal muy elevado durante una avenida, es difícil de medir con exactitud por la fluctuación de niveles, oscilaciones, flotantes y por las condiciones del río en general durante estos eventos, y por lo tanto se aceptará una incertidumbre mayor que en una medida en condiciones normales. El incremento de la velocidad también aumenta la dificultad al aforo, ya que el caudal puede no ser muy importante (como en una riera de gran pendiente) pero la velocidad ser muy elevada, lo que también dificulta el aforo y permite la aceptación de un error mayor al habitual.

7 Conclusiones

Tanto en la gestión y planificación de recursos hídricos, como en el seguimiento de episodios, control de caudales ambientales y de derivaciones, o para el conocimiento del medio, es de gran importancia contar con datos de caudal fiables y de calidad conocida y determinada. Los datos de caudal, transformados luego en información que sintetice el conocimiento, son la base para una buena gestión integrada y sostenible de los recursos. Por lo tanto, **no basta con “medir mucho”, sino que es imprescindible “medir bien” y conocer cuál es la calidad de los datos con los que se toman decisiones importantes**, se establecen límites legales, sanciones, delimitaciones, se llevan a cabo determinadas medidas o incluso se analiza el comportamiento de nuestros ríos en la edición de los anuarios hidrológicos.

La herramienta informática ERCAT permite calcular eficazmente los caudales según procedimientos adaptables a las singularidades del territorio, equipos y red fluvial que se requiera, y determinar la incertidumbre de los caudales aforados que posteriormente sirven para calibrar las curvas de gastos y determinar los caudales circulantes por un canal, un río o cualquier curso de agua.

La utilización del cálculo de incertidumbres ha permitido conocer mejor, no sólo la calidad de los datos medidos, sino también comparar objetivamente el desempeño de instrumentos de medición diferentes, equipos y personal de aforos, conocer la dispersión de variables en el tiempo, evaluar el comportamiento de un determinado punto de control e incluso proponer mejoras en los procedimientos de trabajo tanto de campo como de gabinete para el cálculo de caudales. Finalmente el uso de los indicadores y estadísticas que calcula ERCAT permite, junto al Manual de Aforos de la ACA (actualmente en revisión) y al Manual del Modelo de Servicio de Hidrología, facilitar la externalización de los servicios de aforo así como su control y seguimiento objetivo, dando máxima prioridad a la calidad final del resultado buscado.

8 Referencias bibliográficas

ACA (2003) "*Teoria d'errors 7268-MMDS-DT02*" Documento técnico del Manual del Model de Servei d'Hidrologia, Unitat d'Hidrologia Superficial, Agència Catalana de l'Aigua (ACA)

ACA (2004) "*Manual d'Aforaments 7305-MM-HI-Protocol-v6*" Manual del Model de Servei d'Hidrologia, Unitat d'Hidrologia Superficial, Agència Catalana de l'Aigua (ACA). Manual actualmente en revisió (2011).

DVWK (1990) "*Manual for Water Level Gauging and Discharge Measurement*" (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK)

Helmbrecht, J. et al. (2004) "*Estudio de viabilidad y redacción de un pliego de bases para la contratación de un servicio de mantenimiento, uso y calibración de instrumentos de medida de caudales*", proyecto redactado para la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), como base para el Manual de Aforos de la Unidad de Hidrología.

Hersch, R.W. (1978) "*Hydrometry. Principles and Practices*" John Wiley and Sons

OMM (Organización Meteorológica Mundial) (1994) "*Guía de prácticas hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. OMM nº 168*", ISBN 92-63-30168-9

UNE-EN ISO748 (2001) "Medida de caudal de líquidos en canales abiertos. Métodos de exploración del campo de las velocidades" (AENOR) de acuerdo a la ISO 748:1997. Actualmente ya ha salido la versión ISO748:2009.