

CONSIDERACIONES SOBRE AFOROS DE CAUDALES PEQUEÑOS, CON UNA APLICACIÓN A UN AFORO REALIZADO DE 40 l/s

Kennet Malmcrona.
Mr. Sc. Civil Engineering.
Ingeniero consultor. K.M. -Proyectos, S.A.

RESUMEN

En los últimos años ha ido aumentando el interés por conocer y controlar en el campo caudales cada vez menores. Como punto de partida de un análisis de los aforos con molinete de pequeño caudal se analiza un aforo realizado de un caudal de 40 l/s, con equipos y métodos habituales. Se estudia los distintos factores de error introducidos, llegando a la conclusión que el aforo realizado carece de valor. Se hace recomendaciones sobre como mejorar los resultados de este tipo de aforo, y se presentan métodos alternativos de medición, mejor adaptados a caudales pequeños, y de reducido coste.

ABSTRACT

Water shortages and drought in recent years have called for better methods of field measurement and management of ever smaller flows. As a basis for an evaluation of these small measurements as performed with existing equipment and methods, an analysis is presented of an actual case with a flow of 40 l/sec. An examination of the various factors leading to errors shows that these measurements are not valid. Methods are proposed to improve the results of measurements, and other low-cost systems, better suited to small discharges, are suggested.

INTRODUCCIÓN

La Ley de aguas de 1985, los planes hidrológicos de cuenca, la mayor concienciación de la población y también la extrema sequía de los últimos años ha llevado a un deseo generalizado de gestionar mejor el agua, a conocer y comprobar incluso los caudales de acequias y cauces naturales muy pequeños.

Generalmente estas nuevas comprobaciones se están efectuando por las mismas entidades

que hasta ahora fueron encargadas de la medida de caudales más importantes. Para estos desarrollaron prácticas y disponen de equipos que siguen usando en las nuevas aplicaciones, aun cuando a veces no sean los más adecuados.

El método normal de medir caudales en cauces de tamaño medio es con molinete y las prácticas para ello están muy desarrolladas. En este artículo queremos presentar un análisis de la influencia sobre la garantía de los resultados de los factores que intervienen, y que en cauces pequeños

ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
abril de 1996.

Recibido en ROP:
enero de 1996

Foto 1.
Cauce aforado



resultan de una importancia mayor. Para que sea más ilustrativo el trabajo, lo aplicaremos a una medición real de un caudal de unos 40 l/s en un pequeño cauce natural.

La foto 1 muestra el cauce de la zona del aforo. La foto 2 muestra la medición de la sección mojada y la foto 3 está tomada durante el aforo.

A continuación expondremos las operaciones y circunstancias del aforo, intentando que los comentarios tengan un carácter general para este tipo de mediciones.

Foto 2.
Medida de la sección de aforo.



EQUIPO DE MEDIDA

Se utilizó un molinete de la marca OTT tipo C31 equipado con hélice de plástico de 0,25 m de paso y 125 mm de diámetro. El molinete se monta sobre una varilla circular de 20 mm de diámetro, que atraviesa el cuerpo del molinete. La varilla termina abajo en una punta y pequeña placa que fija su posición sobre el fondo. Está graduada para que se pueda medir la altura del molinete sobre el fondo. La distancia entre la punta de la hélice y la varilla es de unos 18 cm.

Este es el molinete de uso más frecuente en España para hacer mediciones de caudal en ríos y canales.

Las revoluciones del molinete se registraron en un contador, que recibe dos impulsos por vuelta, empezando la cuenta al recibir el primer impulso y registrando luego cada 2 impulsos, durante un tiempo prefijado. Existen también contadores más avanzados, y otros en los que el tiempo se mide cronometrando.

PREPARACIÓN DE LA SECCIÓN DE AFORO

El fondo del cauce en su estado natural era muy irregular con vegetación de ribera y en el mismo cauce, ver foto 1.

Con un azadón de pala ancha se procedió a regularizar el fondo, y se realizó un pequeño encauzamiento con piedras y un bloque de hormigón, ver foto 3, con la intención de facilitar las medidas y mejorar los resultados. Más adelante se comentarán las consecuencias de este encauzamiento, completamente contrarios a los efectos perseguidos.

Bajo los arrastres superficiales el fondo es de arcilla grisácea, como se observan en la foto. En este cauce una regularización produce momentáneamente la suavidad deseada, pero en poco tiempo se forman pequeñas hendiduras e irregularidades.

SECCIÓN MOJADA

Se tomaron desde la orilla tres medidas de la profundidad de agua, y el ancho de la sección, ver foto 2. Los tres puntos medidos fueron situados sin referencias fijas, y las medidas fueron hechas con un metro flexible, que sólo con dificultad se mantenía estirado ante el empuje del agua. Como

este tipo de metros forman un segmento de círculo la corriente no se puede adherir a ella lo que junto a la irregularidad natural del flujo hace difícil la lectura.

Se han introducido numerosos factores de error o imprecisión, siendo los principales:

- ▼ Definir una sección por solo un ancho y tres puntos, siendo en realidad mucho más compleja.
- ▼ Tener que estimar un nivel de lámina fluctuante en un régimen turbulento.
- ▼ Utilizar un instrumento de medida que impide al flujo adherirse a ella.
- ▼ Utilizar un instrumento de medida flexible, que impida que este se pose con sosiego sobre un punto elegido del cauce.
- ▼ No tomar referencias fijas de posición

Resulta difícil evaluar el posible margen de error acumulado de todos estos factores. El error producido solo por la turbulencia se ha estimado en la bibliografía en 10 mm. Supongamos prudentemente que la suma del resto de factores añade otro tanto, y que el margen global sea de 20 mm.

En la figura 1, se ha representado la sección mojada que luego fue utilizada en los cálculos del caudal. Un error de 20 mm en más o en menos en las medidas produce una variación en la sección de más o de menos 20%. Este mismo error es el que se traduce en error del caudal calculado.

Si el mismo análisis anterior se aplicase a un caso más normal para el cual está diseñado el equipo utilizado, como p. ej. un aforo en un canal de riego de 2,5 m de profundidad, el margen de error introducido sería inferior al 1%.

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LA SECCIÓN

En una corriente o canal la distribución de velocidades, en un tramo razonablemente recto e uniforme, depende de la forma de la sección y de la rugosidad. En una corriente en régimen turbulento y de acusada rugosidad, la distribución depende prácticamente sólo de la forma de la sección. En las referencias bibliográficas (Chow, Open Channel Hi-

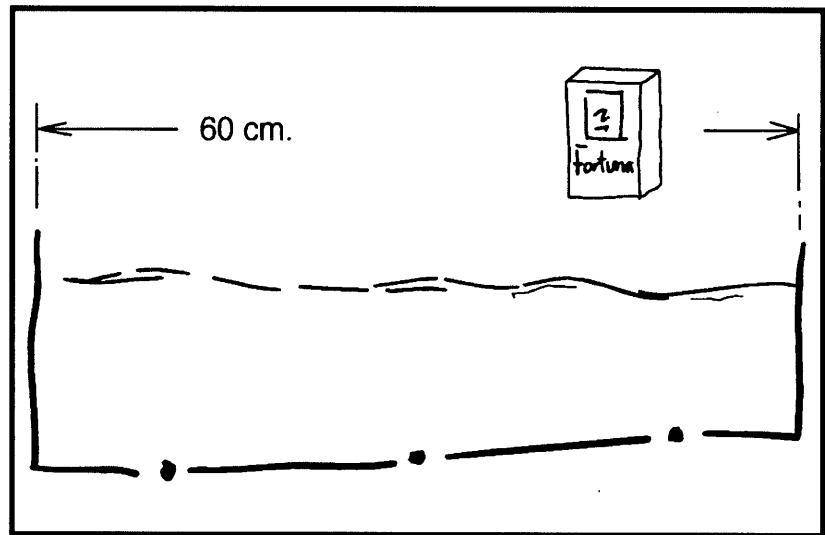


Figura 1. Sección aforada.
(Puntos medidos. Paquete de cigarrillos a escala).

draulics) se encuentra entre los ejemplos una sección muy similar a la de nuestro cauce en la sección aforada, ver la fig. 2. En la misma figura se ha hecho una interpretación, en semejanza hidráulica, de como podría o debería ser la distribución de velocidades en nuestro aforo, siempre que el aforo se hubiese hecho en un tramo uniforme y recto.

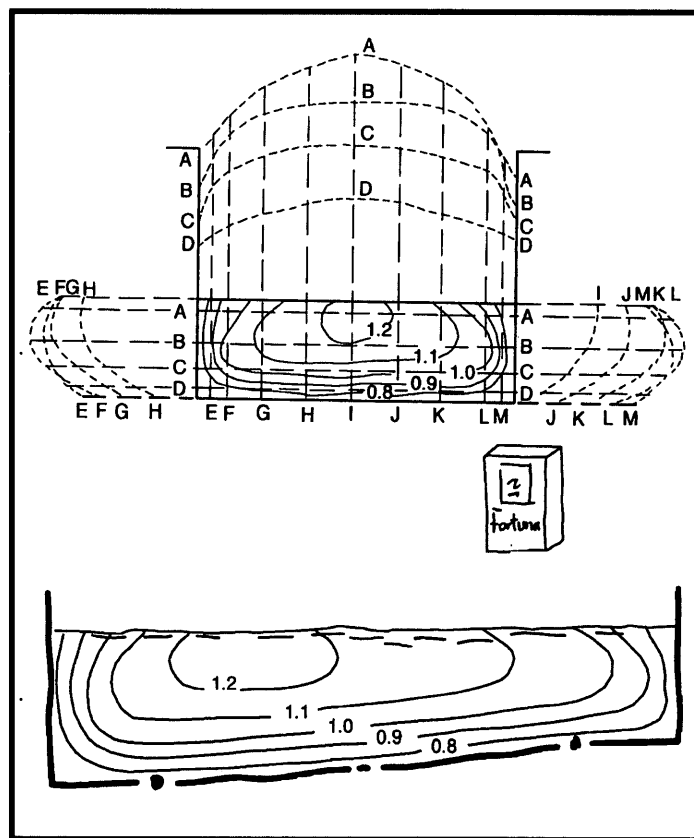


Figura 2.
Distribución de velocidades en sección rectangular según Chow, y equivalencias en la sección aforada.

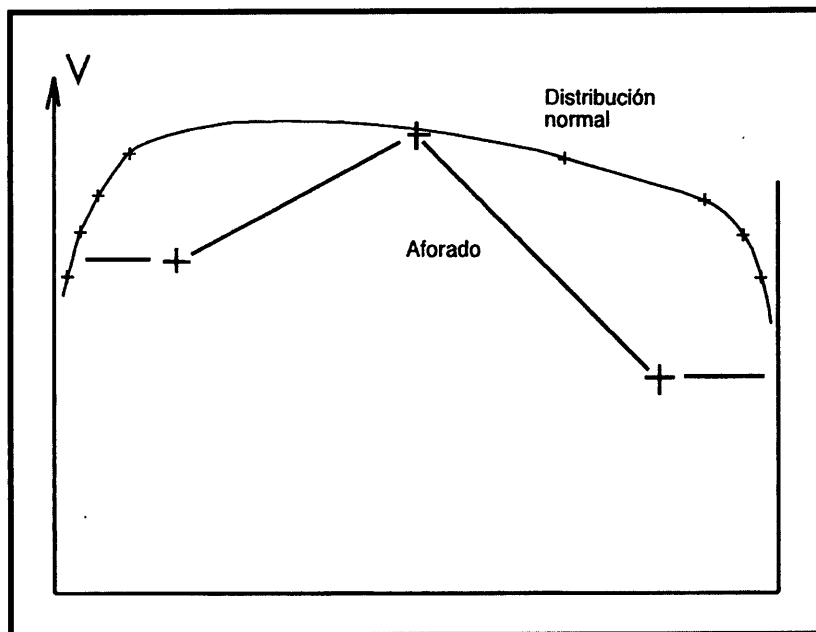


Figura 3.
Distribución de
velocidades.

Si de las medidas de aforo se obtuviese una distribución de velocidades sensiblemente diferente a las de la figura 2, algo extraño o inusual ocurre y debe ser comprendido y explicado antes de que se dé valor a las medidas obtenidas. Lo más probable es que éstas, o algunas de éstas, hayan sido erróneas.

En nuestro ejemplo se tomaron tres medidas en la sección transversal. En la figura 3 se han señalado las velocidades en estos puntos, y la distribución de velocidades que se supuso al calcular el caudal.

También se ha señalado la distribución de velocidades obtenida de la figura 2, haciendo coincidir la velocidad aforada en el centro de la corriente con la misma velocidad sobre la curva teórica de distribución. De las curvas se deduce claramente que algo ha fallado en los aforos o en su preparación. A continuación analizaremos algunas de las circunstancias que pueden haber sido las causantes de ello.

Todas las recomendaciones sobre la ejecución de aforos requieren bien que se tome medidas en un mínimo de 10 secciones verticales, o impone condiciones a las diferencias de caudal entre tramos adyacentes en los que se ha subdividido la sección transversal.

En nuestro ejemplo, si la distribución de velocidades hubiese sido el habitual, y la medida central correcta, pero no así las laterales, entonces el caudal real hubiese sido un 28% superior al calculado.

Hay que señalar que casi todas las influencias sobre una medida de la velocidad con molinete son negativas, en el sentido de disminuir la velocidad calculada en relación con la velocidad real.

ALGAS, VEGETACIÓN Y ARRASTRES

El motivo más frecuente de que las medidas con molinete en cauces pequeños indiquen velocidades inferiores a las reales es que la rotación de la hélice se frena, por tocar la vegetación del fondo y de las orillas, por enredarse en algas flotantes o por tocar arrastres que se mueven por el fondo. Las algas y la vegetación producen un frenado suave, difícil de percibir si no llega a casi parar la hélice. El contacto con arrastres, aunque más brusco, tampoco se nota siempre con claridad.

La única precaución posible es prestar una atención constante, y anular las medidas durante las cuales se sospecha alguna anomalía. Para evitar los arrastres hay que colocar la hélice a suficiente altura sobre el fondo. Si el agua no es transparente, resulta imposible cualquier aforo, en presencia de algas o vegetación.

En el aforo que hemos tomado como ejemplo, la presencia de algas fue importante, y hubo que repetir varias veces las medidas. La mayoría de los aforos que se efectúan no se ven afectados por las algas, y por ello es fácil que no se preste una atención que habitualmente no resulta tan necesaria.

En el aforo efectuado hubo también que repetir medidas afectadas por vegetación de fondo, y en anteriores ocasiones por tocar los arrastres a la hélice. Estos son aquí de hasta 2 a 5 cm de diámetro, al estar formados por piedras tobáceas muy ligeras.

Como medida de la densidad de algas en el agua del aforo podemos señalar que la parte de la corriente derivada a una minicentral hidroeléctrica taponaba completamente su rejilla en unas dos horas.

SUMERGENCIA DE LA HÉLICE

La hélice del molinete tiene que moverse sumergida en todo su círculo de acción, y estar ligeramente cubierta por el agua. No se encuentran datos precisos entre las referencias bibliográficas o en las recomendaciones de los fabricantes, pero una medida razonable podría ser exigir una su-

mergencia mínima del 20% del diámetro de la hélice. No se han encontrado referencias de ensayos o curvas de tarado de molinetes sólo parcialmente sumergidos, por lo que su comportamiento en estas condiciones no parece estar investigada. Ningún experto consultado ha admitido el uso de hélices semisumergidas.

En la figura 4, se ha dibujado la posición de la hélice en la sección del aforo realizado, la lámina de agua durante el aforo, y la lámina mínima exigible. La fotografía 3 se tomó durante el aforo.

Observando la figura y la fotografía hay que concluir que los resultados del aforo no son válidos, aunque todas las otras circunstancias del aforo hubiesen sido correctas.

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DENTRO DEL CÍRCULO DE COBERTURA DE LA HÉLICE

En todos los aforos con molinete se supone la velocidad igual en el área barrido por la hélice, y la velocidad medida se asigna al punto central o eje del molinete. Es también el método de calibración del molinete con su hélice, que en esa operación se monta bajo un carro, que a velocidad constante y conocida, se mueve sobre un canal de aguas quietas, en el cual se sumerge el molinete.

Si la hélice es grande, en relación con la sección mojada del cauce, no se cumplirá esa condición, sino que dentro del área que barre la hélice, las velocidades pueden variar entre amplios límites. En esta condición no se conoce la reacción de la hélice, y no tenemos noticia de ningún fabricante o laboratorio que haya intentado establecer las relaciones correspondientes. La única recomendación posible es utilizar hélices más pequeñas, y cuando esto ya no resulte posible, acudir a otros métodos de medida de caudal.

En el aforo analizado, la diferencia de velocidades dentro del área de acción de la hélice llega a un 40%, por lo que los resultados del aforo no pueden ser aceptados.

CORRIENTE UNIFORME

Las recomendaciones sobre la realización de aforos piden siempre que la sección de aforo se sitúe en un tramo recto, lo más largo y regular posible, para que se reduzcan las turbulencias y corrientes transversales, y para que la distribución

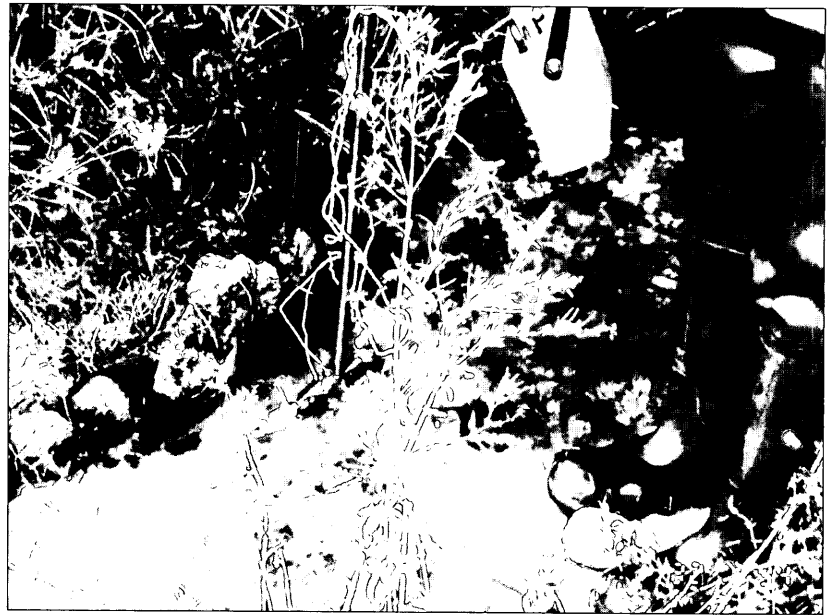
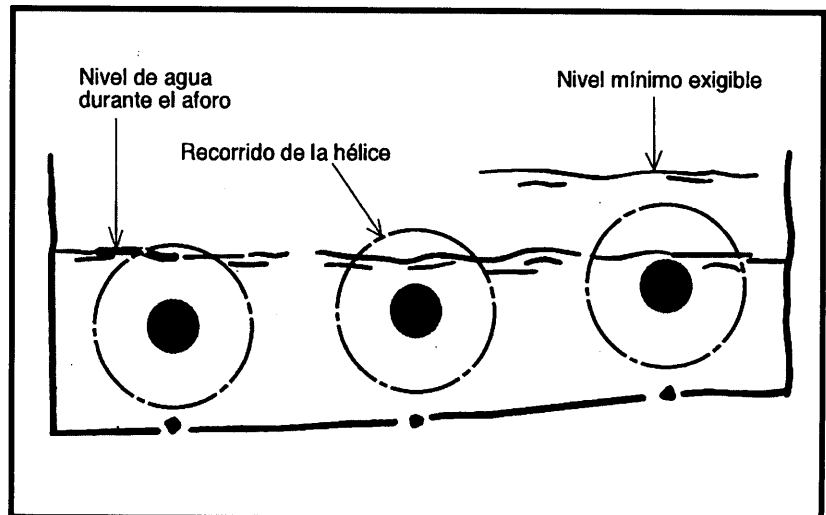


Foto 3. Aforando, con la hélice parcialmente fuera del agua.

de velocidades en la sección sea lo más normal posible. La hélice utilizada en el aforo no admite componentes transversales de la corriente, sin introducir errores significativos.

Sin embargo, en el aforo del caudal que analizamos, por su pequeño tamaño, el aforador consideró aconsejable constreñirlo a una sección más estrecha, y de orillas verticales, ver foto 3. Con ello introdujo por un lado unas componentes transversales en el flujo superiores a las admisibles, un flujo más inestable, por los remolinos laterales producidos, y también una excesiva sensibilidad de la medida al posicionado exacto de la hélice, ya que las velocidades varían apreciablemente en el sentido longitudinal, como también la lámina de agua, sensible a la variación de la energía

Figura 4. Posiciones del molinete al aforar.



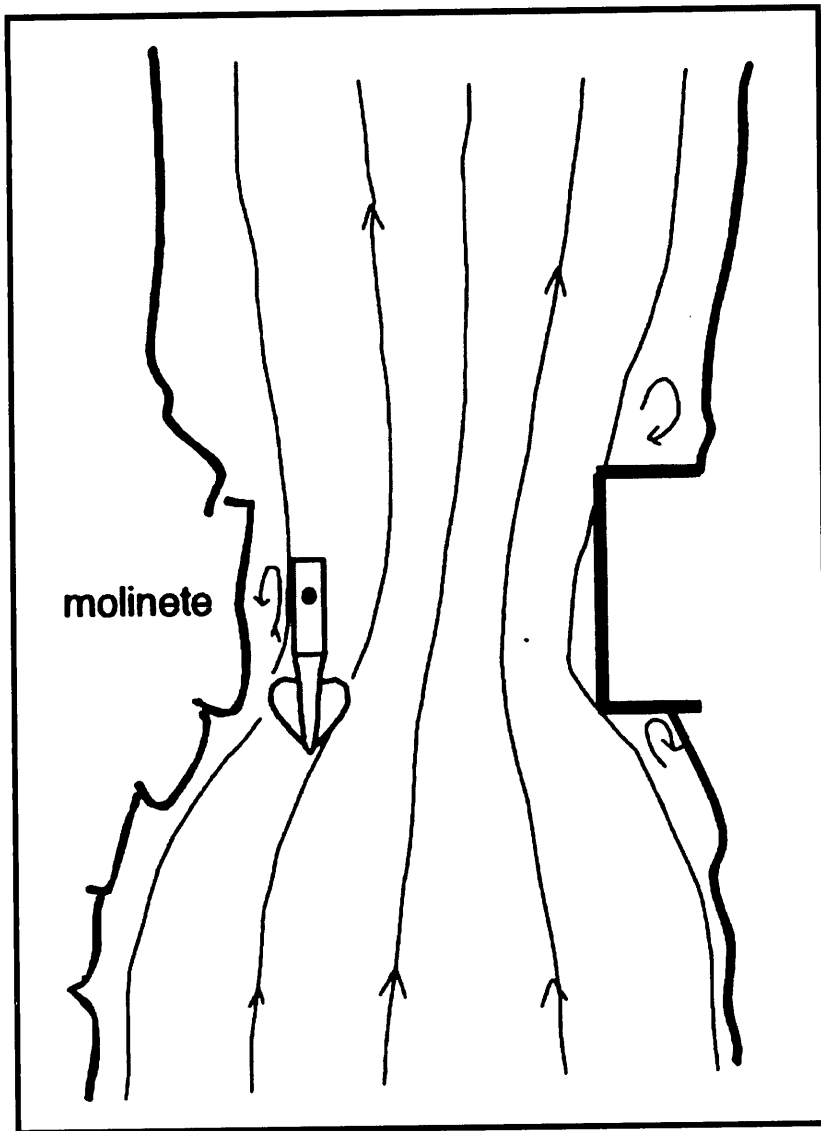


Figura 5. Líneas de corriente en el tramo de aforo.

cinética en cada punto. Para mayor comprensión de esta circunstancia se han dibujado, en la figura 5, las líneas de corriente probables y la situación del molinete, a su tamaño, en uno de los puntos de medida de la sección.

ERRORES EN EL CÁLCULO DE VUELTAS DE LA HÉLICE

En un aforo normal el tiempo de medida en cada punto no suele ser inferior a un minuto, y normalmente las velocidades son más grandes que en una sección pequeña, lo que aumenta el número de vueltas registrados. Los puntos medidos son

también muchos más, lo que estadísticamente tiende a compensar errores en más y en menos.

Si en el aforo de un caudal muy pequeño y con pocos puntos de medida se pretende la misma precisión en resultados que en uno grande, se deben pues aumentar los tiempos de medida, y no disminuirlos, como se hizo en el aforo comentado.

Como ejemplo de las posibles consecuencias en el aforo del pequeño caudal que analizamos, hemos supuesto primero que en las tres mediciones del aforo el primer impulso se registró inmediatamente después de empezar el cómputo del tiempo, y el último justo antes de acabar el tiempo. Luego hemos supuesto que el cómputo del tiempo comenzó justo después de pasar el momento de un impulso y terminó justo antes de llegar el momento de contabilizar un impulso.

La diferencia en el número de vueltas, en cada medición y con el contador utilizado, sería de 1,5. En este caso, el cálculo arroja como resultado una diferencia de un 3% en el caudal. El cálculo se presenta en el cuadro 1.

ERRORES EN EL SITUADO DEL MOLINETE

En aforos normales, los pequeños errores de situación del molinete en la sección de medida que inevitablemente se cometen no suelen tener mayor importancia.

En un cauce pequeño e irregular las circunstancias resultan muy distintas. Pequeños errores en las colocaciones del molinete pueden causar errores importantes en el caudal calculado. La situación se refiere a la lateral, a la vertical y a la longitudinal.

Un error en la posición vertical hace que la relación entre la velocidad medida y la media en la sección no corresponde a lo supuesto. Un error en la posición longitudinal puede producir errores en la profundidad y en la velocidad, ya que ninguno de ellos corresponderá a la sección a la cual luego se aplicará el cálculo del caudal. En la presencia de curvas, estrechamiento o un régimen alrededor del crítico la distorsión en el resultado que puede producir un posicionado impreciso en el sentido longitudinal resulta sorprendente, llegando fácilmente a producirse un error de 20% en condiciones similares a los del aforo analizado, representado en la figura 5.

Para ilustrar las consecuencias de un posicionado transversal impreciso en un aforo pequeño, con tres puntos de medida, analizamos la fotogra-

CUADRO 1. TABULACIÓN DE LOS CÁLCULOS
DISTANCIAS

A la margen	Del Molinete al fondo	Revolu- ciones	Tiempo	n=N/t	Velocidad	Vm en la vertical	Profun- didad total P	Producto	Semisuma de	Distancias parciales	Volúmenes o caudales
(m)	(m)	N	t (sg)	(N/sg)	V (m/sg)	(m/sg)	(m)	PxVm	PxVm	(m)	(m ³ /sg)

REGISTRO Y CÁLCULO ORIGINAL

0.00	O.D.	con P y V									
0.10	0.06	39	30	1.30	-	0.337	0.11	0.037	0.037	0.10	0.004
0.30	0.06	85	30	2,83	-	0.724	0.13	0,094	0.066	0.20	0.013
0.50	0.07	61	30	2,03	-	0.521	0.14	0.073	0.084	0.20	0.017
0.60	O.I	con P y V							0,0073	0,10	0,007
										Q =	0,04

CÁLCULO VARIANDO EL REDONDEO

1.31	0.340	0.12	0.041	0.041	0.10	0.004
2.84	0.727	0.14	0.002	0.072	0.20	0.014
2.04	0.524	0.15	0.079	0.091	0.20	0.018
				0.070	0.10	0.008
					Q =	0.044

CÁLCULO CON REVOLUCIONES + 1,5

0.00				(1)					
0.10	40.5	30	1.35	0.350	0.11	0.039	0.039	0.10	0.0039
0.30	86.5	30	2.88	0.737	0.13	0,096	0.068	0.20	0.0136
0.50	62.5	30	2.08	0.534	0.14	0,075	0.086	0.20	0.0172
0.60							0.075	0.10	0.0075
								Q =	0.0422

fía 3. Midiendo lo mejor posible sobre la fotografía, resulta que la distancia del molinete a la orilla es de 13 cm en vez de los 10 supuestos. Se ha repetido el cálculo de caudales tal como se hizo, manteniendo los valores de velocidad que se obtuvieron, pero suponiendo errores de posicionado lateral del molinete de ± 3 cm, en ambas medidas laterales, obteniendo una diferencia en los caudales calculados del 9%, por este solo motivo.

PRECISIÓN NUMÉRICA Y REDONDEO

Todas las entidades que con cierta frecuencia realizan aforos con molinete han desarrollado impresos que les facilita en el campo la toma ordenada y completa de los datos, y luego el cálculo,

directamente en el campo ó posteriormente en gabinete.

Es normal que el mismo impreso obligue, o la costumbre de su uso lleve, a utilizar unas unidades, número de decimales, etc., siempre iguales. Aplicado a aforos fuera del ámbito habitual produce la impresión de una falsa precisión en aforos de grandes caudales, y al contrario en los aforos de caudales muy pequeños disminuye la precisión que podría conseguirse.

En el pequeño aforo que usamos para ilustración hemos analizado el efecto de un simple redondeo. En el registro original hemos supuesto que los tres valores de revoluciones por segundo y los tres de profundidad están redondeados a la baja y hemos calculado el incremento que se produce al redondearlos hacia arriba, presentando el

cálculo en el cuadro 1. El resultado es un incremento en el caudal superior al 7%.

INTEGRACIÓN DEL CAUDAL

Efectuadas todas las mediciones el cálculo del caudal puede efectuarse por métodos distintos, cuya identificación por nombres en español no está completamente inequívoca. Se podrían denominar

- ▼ método de media entre secciones
- ▼ método de la sección media
- ▼ regla parabólica de Simpson
- ▼ método trapezoidal
- ▼ integración gráfica en vertical y horizontal

No tiene mayor interés explicar aquí las diferencias entre ellos, por otro lado bastante ilustrado por su denominación.

Aun en aforos con 10 secciones en cauces sin irregularidades de forma o en la distribución de velocidades, los ejemplos aportados en la bibliografía arrojan diferencias en los resultados de cálculo del 3%, según el método utilizado. Esa diferencia aumenta rápidamente cuando se disminuye el número de secciones.

En el ejemplo que analizamos se ha utilizado en principio el método de media entre secciones, que utilizado de forma habitual hubiese arrojado un caudal de 36 l/s, es decir 12% inferior al indicado de 41 l/s. El aforador ha entendido que suponer nulo el caudal (el producto de velocidad media por profundidad) en las orillas, al aplicar el método, hubiese llevado a un error superior a aquel que se comete al considerarlo igual al caudal en las

secciones adyacentes. La diferencia ilustra el error que se puede introducir simplemente por la forma matemática de integrar, cuando las secciones aforadoras son demasiado escasas, como en nuestro caso.

MOLINETES Y HÉLICES

El molinete y su hélice deben ser adecuados al aforo que se vaya a realizar.

A un mismo cuerpo de molinete se puede adaptar distintas hélices.

Simplificando se podría decir que cuanto más grande el cuerpo, más robusto resulta el equipo.

Las hélices mayores tienen diámetro del orden de 13 cm, y las más pequeñas, de uso normal sólo en laboratorios, del orden de 2 cm.

La velocidad mínima del agua suele variar de 0,025 a 0,060 m/s, y la máxima de 1 a 10 m/s.

El paso de la hélice, es decir la distancia que tiene que recorrer el agua para que la hélice dé una vuelta, varía normalmente entre 3 cm y 1 metro.

El material de la hélice suele ser plástico, latón o aluminio, siendo en general la calidad decreciente en el mismo orden.

Otra característica importante de la hélice es su sensibilidad a componentes transversales de la corriente. El diseño y la fabricación de una hélice menos sensible a la componente transversal resulta más complicado y costoso.

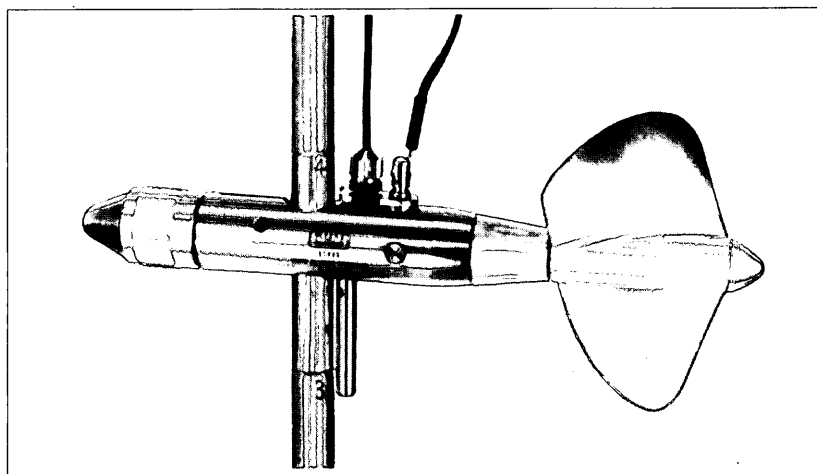
Aplicando lo anterior al aforo estudiado, se puede decir que el equipo utilizado fue inadecuado, al ser excesivo el tamaño de la hélice, y al no admitir componentes transversales superiores a 5°. Se representa en la foto 4 el tipo de molinete y hélice utilizado.

TARADO DE LOS MOLINETES

El cuerpo del molinete, con su eje y rodamientos y mecanismo de impulsos, es una pieza delicada de mecánica de precisión y sujeta a desgaste, ante todo por las impurezas del agua. Los esfuerzos que actúan sobre las hélices, haciéndoles rodar, son extremadamente reducidos con velocidades lentas del agua y hélices de pequeño diámetro.

Las hélices están sujetas a variación de su geometría, por choques y golpes y en menor grado por desgaste. Cualquier variación de su forma o

Foto 4. Molinete empleado en el aforo analizado.



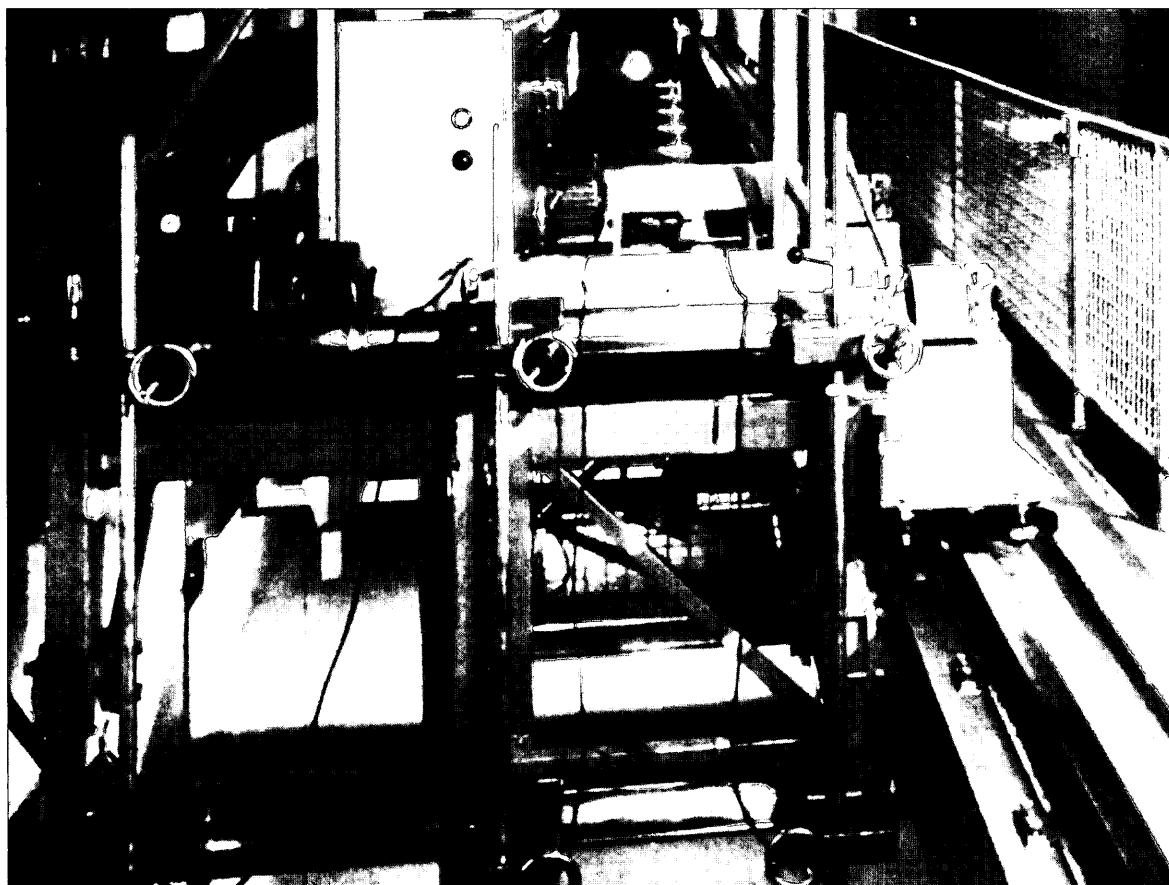


Foto 5. Canal de tarado de molinetes.

característica de superficie influye en su comportamiento.

Un molinete con sus hélices, al ser comprado, se entrega con las correspondientes curvas de tarado que relacionan la velocidad del agua con las vueltas de la hélice.

Estas curvas de tarado, por las razones expuestas, varían con el tiempo, por lo que deben ser renovadas. Establecer la nueva curva es una operación costosa, al exigir disponer en un laboratorio de un canal largo, con un equipo especializado y caro. En España, uno de estos canales se encuentra en las instalaciones del CEDEX en Madrid.

En la foto 5 se representa el canal y equipo de tarado de un fabricante de molinetes.

Toda la bibliografía y expertos coinciden en la necesidad de los tarados periódicos, pero no se aportan normas concretas sino del tipo "al menos una vez al año", "periódicamente", etc.

La única norma concreta conocida es de U.S.Bureau of Reclamation, que utilizando un molinete standard, exige la prueba del molinete y la observación de la hélice, antes de cada aforo y anotando el resultado en cada protocolo de aforo. Es una prueba simple, que relaciona el tiempo de

rodar libre con el estado de conservación del molinete.

La labor requerida y el coste, y la falta de una norma concreta, ocasiona frecuentemente que el organismo aforador prescinda de tarar adecuadamente los molinetes. En el caso del aforo analizado en este artículo, el molinete llevaba utilizándose 21 años sin tarar.

RECOPILACIÓN DE LOS FACTORES QUE ALTERAN EL AFORO ANALIZADO

Se ha analizado las posibilidades de medir caudales pequeños en cauces naturales con los equipos de molinete más usuales, aplicando el análisis a un aforo real con un caudal estimado en 40 l/s.

Como resultado se concluye que ese aforo tiene que ser rechazado de plano por varios motivos, y por otros su posible error rebasó cualquier límite razonable.

En este caso los motivos de rechazo total serían:

- ▼ Al no quedar cubierta la hélice por la corriente no resultan aplicables las curvas de tarado del molinete.
- ▼ Al cubrir el círculo de acción del molinete áreas grandes de la sección mojada, tampoco resultan aplicables las curvas de tarado.
- ▼ La excesiva presencia de algas enredándose en el molinete.
- ▼ Haber arrojado las medidas unos valores de velocidad incongruentes.
- ▼ Al no haber sido tarado el molinete en 21 años.

Los motivos que restaron precisión al aforo, haciendo su resultado prácticamente aleatorio, aun si no hubiesen existido los motivos de rechazo total antes expuesto; fueron:

- ▼ El excesivo margen de error en la medición de la sección mojada.
- ▼ La indefinición de la distribución de velocidades, en la sección transversal, al solo disponer de 3 puntos de medida, con resultados no congruentes entre sí.
- ▼ La imprecisión en el posicionado del molinete en la sección transversal, longitudinal, y vertical, al aforar en un estrangulamiento brusco de la corriente.
- ▼ La dirección oblicua de la corriente respecto a la sección de medida, al efectuar el aforo en un estrechamiento.
- ▼ Falta de precisión en el número de vueltas computadas de la hélice.
- ▼ Excesivo redondeo en toma de datos y cálculos.
- ▼ Excesiva imprecisión del sistema de integración del caudal, por sólo disponer de tres medidas.

POSIBLES MEJORAS EN EL AFORO ANALIZADO

Antes de acometer un aforo con molinete en un cauce pequeño resulta imprescindible analizar individualmente las circunstancias del emplazamiento y los márgenes de error inevitables, y en relación con el equipo y medios disponibles. Si del análisis se desprende que no se puede alcanzar la precisión mínima requerida, debe prescindirse de la medición.

En el caso que hemos analizado, las características del cauce parecen hacer imposible alcanzar una precisión de $\pm 10\%$, que se podría considerar la mínima para justificar un aforo de este tipo. Sin embargo hay muchas acciones que podrían haber mejorado el aforo, hasta conseguir una precisión de al menos $\pm 20\%$.

Hubiesen sido:

- ▼ Equipar el molinete con una hélice menor. Mucho mejor hubiese sido utilizar un equipo menor, un micromolinete.
- ▼ Utilizar una hélice menos sensible a las componentes transversales de la corriente.
- ▼ No estrangular la sección. La canalización, tal como fue realizada, resultó contraproducente.
- ▼ Aumentar la sección, remansando el agua con unas piedras aguas abajo. Si se hubiese aumentado la profundidad al doble (de 15 a 30 cm), hubiese disminuido el error de la sección al menos a una cuarta parte, al no solo disminuir a la mitad el error relativo de la posición medida del fondo, sino al tranquilizar la lámina y poder leer su nivel con precisión. También hubiésemos evitado el arrastre de piedras por el fondo durante la ejecución del aforo, y hubiésemos facilitado el control de las algas.
- ▼ Colocar un tablón sobre la sección, para comodidad de medidas, para aumentar su fiabilidad, y para señalización de posiciones exactas.
- ▼ Utilizar más de tres secciones de medida. Al disminuir el tamaño de la hélice, y al ampliar la sección, eliminando el estrangulamiento y elevando el nivel, hubiesen cabido más secciones. Ninguna recomendación publicada admite menos de 10 secciones, aunque eso aquí no hubiese sido posible.
- ▼ Aumentar el tiempo de medida de 30 a 100 segundos.
- ▼ Utilizar un molinete con tarado que pudiese considerarse válido.
- ▼ En el momento de aforar, dibujar las curvas de velocidades obtenidas, y repetir las medidas cuyos resultados fuesen incongruentes.
- ▼ Realizar unas medidas de comprobación de la distribución vertical de velocidades.
- ▼ Analizar, dibujando la sección y las velocidades, cual sería el mejor método de integración, y aplicar ese método al calcular el caudal.

Lo aquí dicho es válido para cualquier aforo con poco caudal, aunque las recomendaciones tienen que adaptarse a cada sitio particular. Lo importante es acometer ese análisis previo, antes de realizar el aforo.

ALTERNATIVAS PARA LA MEDIDA DEL CAUDAL

La exposición anterior podría haber dado la impresión que resulta imposible medir ocasionalmente y con precisión aceptable caudales pequeños en cauces naturales y pequeñas acequias. Nada más lejos de la realidad, sólo que los métodos tienen que ser otros.

La primera alternativa es sustituir el molinete por un sensor capacitativo. La ventajas son:

- ▼ miden en aguas menos profundos, desde 3 cm.
- ▼ es insensible a algas flotando, a la vegetación de ribera y cauce, y a los arrastres por el fondo.
- ▼ mide la componente axial del flujo, independiente del ángulo de incidencia.
- ▼ mide directamente la velocidad instantánea, y la media en un tiempo prefijado.

El método no elimina las dificultades de definir con precisión la sección mojada de la corriente, fondo y lámina de agua, y el equipo es costoso. En la foto 6 se presenta una sonda capacitativa con su contador.

La segunda alternativa es instalar provisionalmente un vertedero de pared delgada. Para una instalación rápida, es necesario que el terreno no sea muy duro y que se pueda crear un pequeño desnivel. Para unos 100 l/s, el desnivel será de 30 cm, si se monta un vertedero rectangular de 50 cm en un contrachapado de unos 200x75 cm, que se puede llevar fácilmente sobre la baka de cualquier turismo.

La operación de colocar el contrachapado, puede efectuarse entre dos personas en un tiempo similar a aquel de efectuar un aforo con molinete, y la precisión de la medida no será inferior a $\pm 2\%$, siempre que se tenga, aunque someramente, en cuenta las condiciones aguas arriba, ampliamente tratadas en las referencias bibliográficas.

Una tercera alternativa sería la instalación provisional de un canal aforador prefabricado (ver fi-

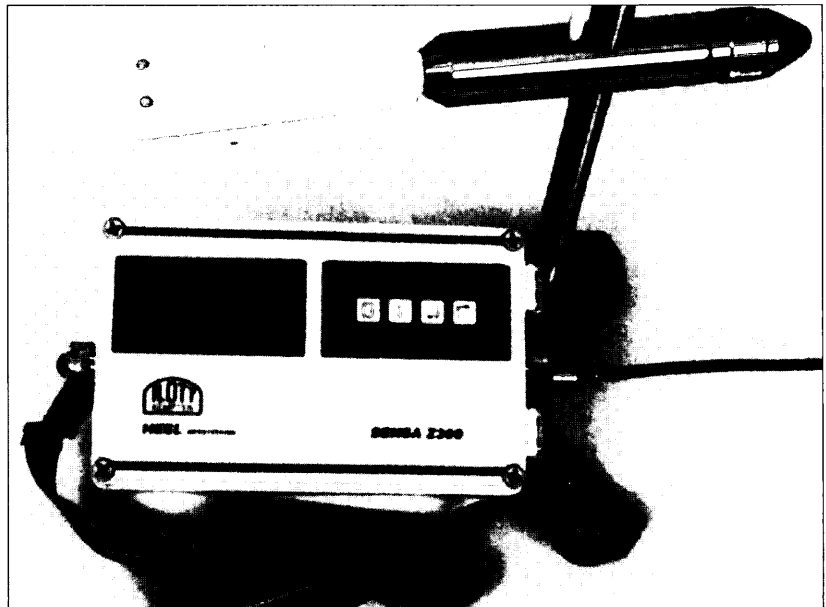
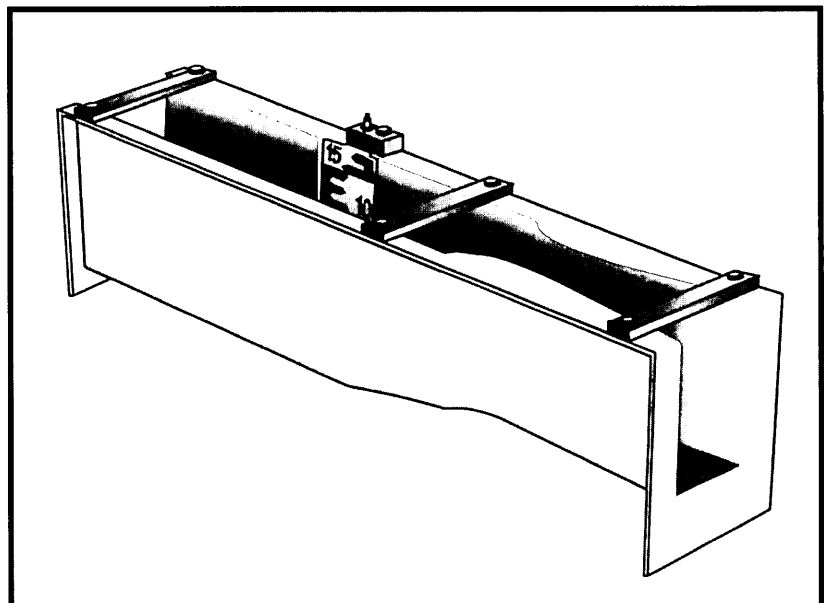


Foto 6. Sonda capacitativa con su contador.

gura 6). En una solución comercial, para medir un caudal de hasta 74 l/s, el peso total del canal, en dos piezas de 2 metros de largo, es de 36 Kg, es decir fácilmente transportable en la baka de un turismo.

Las ventajas en relación con un vertedero en pared delgada es que el desnivel necesario resulta mucho más pequeño, del orden de 8 cm, y que no se impone condición alguna sobre la sección transversal de la corriente aguas arriba. La instalación es igual de sencilla y la precisión en la medida resulta también fácilmente superior a $\pm 2\%$.

Figura 6. Modelo francés de canales aforadores prefabricados.



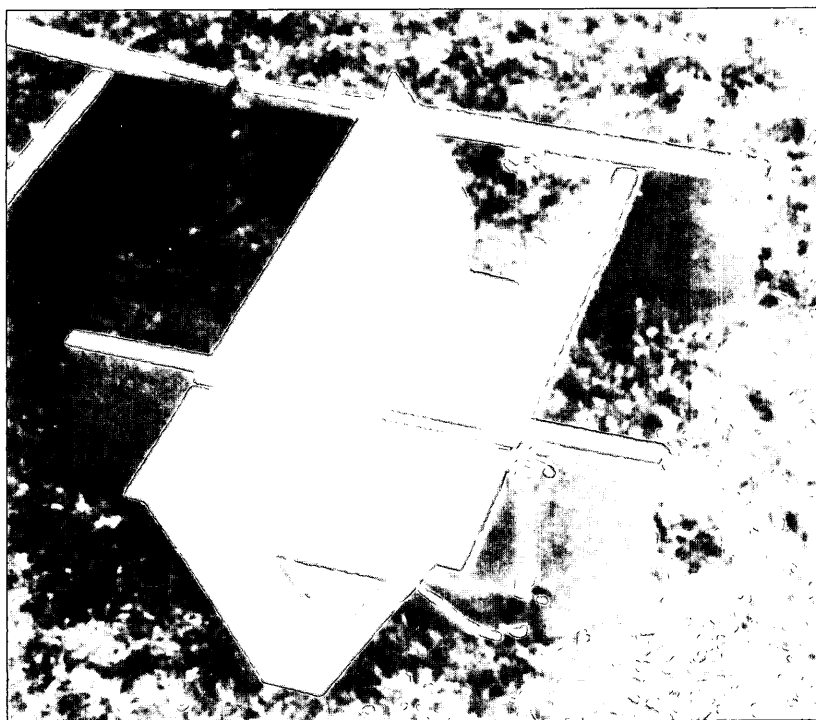


**Foto 7. Modelo
holandes de
aforador
transportable.**

Otra solución de aforador prefabricado está representado en la foto 7. El modelo, utilizado en Holanda, está detalladamente descrito en la bibliografía, en varios tamaños para caudales hasta 49 l/s.

Ni el vertedero en pared delgada ni el canal aforador se ve afectado por vegetación, algas arrastres y tampoco por las medidas imprecisas de formas o tiempos, sino exclusivamente de la medida de la altura de la lámina vertiente, que puede hacerse con bastante precisión, alcanzando los resultados indicados.

OBSERVACIONES FINALES

Si se quiere medir ocasionalmente un caudal pequeño, inferior a unos 100 l/s, en un cauce natural o en una acequia no revestida, no se debe optar a priori por método alguno.

Primero se debe analizar las condiciones de la corriente: vegetación en fondo y riberas, arrastres por el cauce, algas flotando en el agua, regularidad de la lámina de agua, y del cauce aguas arriba, forma de la sección mojada y si se eleva el ni-

vel artificialmente, facilidad para hacer rozas o pequeñas correcciones del cauce, posibilidad de crear desniveles, etc.

Luego se debe definir el equipo de medida disponible o de posible adquisición, teniendo en cuenta que el vertedero de pared delgada y el canal aforador prefabricado son soluciones de bajo coste.

Después debe definirse el margen de error admisible en el caudal que se pretende calcular, y efectuarse unos sencillos cálculos de sensibilidad sobre el error que se puede introducir por los distintos factores que intervienen en la medida. Si un método de medida puede introducir errores excesivos, este debe ser rechazado, recurriendo a otro más preciso. Si el error deseado es como máximo $\pm 10\%$, entonces las exigencias sobre aforos con molinete se volverán difíciles de cumplir, en la mayoría de los casos, y hay que recurrir a un tipo de vertedero en pared delgado o a un canal aforador, ya que en ambos la precisión normal es superior a $\pm 2\%$.

BIBLIOGRAFÍA

- French, Richard H.** Open-channel hydraulics. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1985.
- Corbett, D.M.** Stream Gaging Procedure, Water Supply Paper 888, U.S. Geological Survey, Washington, 1943.
- Bos, M.G.** Aforadores de caudal para canales abiertos ILR. Publicación no. 38, Wageningen, Holanda, 1986.
- García Lozano, F.** Medición del agua de riego. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid 1977.
- Chow, Ven Te,** Open-channel hydraulics, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 1973.
- Bureau of Reclamation,** Water Measurement Manual, U.S. Government Printing Office, Washington, 1984.
- Shaw Elizabeth M.,** Hidrology in Practice, Van Nostrand Reinhold, Wokingham, Inglaterra, 1984
- Roche, M.,** Hydrologie de Surface, Gautiers-Villards Editeurs, Paris, 1963.
- Davis, Calvin V.** Handbook of Applied Hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 1970. ●