

# Calibración de un aforador mediante uso de velocímetro acústico doppler y modelo matemático unidimensional

Francisco Javier Pérez de la Cruz, Luis G. Castillo Elsitdié  
 Grupo de investigación Hidr@m en Ing. Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental  
 Unidad Predepartamental de Ingeniería Civil  
 Paseo Alfonso XIII, 52. 30203 Cartagena (Murcia)  
 E-mail: javier.cruz@upct.es, luis.castillo@upct.es

**Resumen.** A la hora de medir caudales con dispositivos de aforo es importante verificar que estos mantienen unas determinadas condiciones que aseguren y garanticen su correcto funcionamiento y, con ello, la exactitud de las medidas obtenidas. El presente artículo describe la calibración realizada en el aforador rectangular situado al final del túnel de desagüe del aliviadero Morning Glory de la presa del río Taibilla mediante el modelo matemático HEC-RAS y una campaña de aforos realizada con un velocímetro acústico doppler.

## 1. Introducción

El dispositivo de aforo se encuentra ubicado al final del túnel de desagüe del aliviadero Morning Glory de la presa del río Taibilla, en Nerpio (Albacete).



Fig. 1. Vista del aliviadero Morning Glory del embalse del Taibilla

El agua llega al canal por caída libre desde las tomas ubicadas en el cuerpo del aliviadero y tras recorrer una distancia de 80 metros llega a la sección donde se encuentra situado el aforador.



Fig. 2. Salida de las tomas del embalse

A los pocos metros de la incorporación del agua al canal se dispusieron dos elementos de tranquilización (vertederos de pared gruesa) que tienen como objetivo regularizar el flujo de aproximación a la sección de control.

La tipología del aforador corresponde a un vertedero rectangular de pared delgada de contracción completa que cumple las condiciones de dicha tipología.



Fig. 3. Vista del aforador del embalse del Taibilla

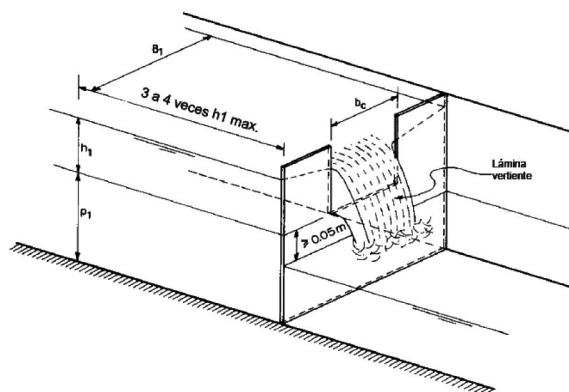


Fig. 4. Vertedero rectangular de pared delgada

## 2. Verificación del funcionamiento

### 2.1. Revisión de la curva de desagüe

Inicialmente se verificaron las dimensiones y disposición de los elementos del aforador, comprobándose que la sección de aproximación al mismo no es rectangular (ovoide), por lo que la curva de descarga teórica sólo puede considerarse como

una aproximación, teniendo que obtener la curva de descarga real mediante otros métodos.

Dicha curva teórica, obtenida aplicando las fórmulas de Kindsvater-Carter (1957) mediante la hoja de cálculo desarrollada por el *Water Resources Research Laboratory* perteneciente al *United States Bureau of Reclamation* (USBR) queda definida por la siguiente ecuación:

$$Q = 5,3066 \cdot h^{1,4967} \quad (1)$$

## 2.2. Cálculo mediante el programa HEC-RAS

Como un método teórico adicional de verificación de la curva de descarga del aforador se aplicó el Programa *River Analysis System* (HEC-RAS) Versión 3.1.3 del Centro de Ingeniería Hidrológica del *U.S. Army Corps of Engineers*, que modeliza las condiciones de flujo en régimen permanente, unidimensional y gradualmente variado. El objetivo principal del programa HEC-RAS es calcular la cota de agua en los puntos de interés en función del caudal circulante a lo largo del río o encauzamiento.

Para realizar la simulación se emplearon 20 secciones tipo que dieron lugar a 90 perfiles transversales de cálculo y se establecieron 39 caudales, desde 0,05 m<sup>3</sup>/s hasta 2 m<sup>3</sup>/s en intervalos de 0,05 m<sup>3</sup>/s. Además de estos datos, el modelo requiere la definición de condiciones de contorno tanto externas como internas.

## 2.3. Comprobación mediante aforos

Con el fin de verificar los resultados teóricos obtenidos se realizó una campaña de mediciones en el lugar donde se encuentra situado el aforador utilizando dos velocímetros acústicos de alta frecuencia, también llamados ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*). Estos instrumentos sirven para medir velocidades en un medio acuoso y su funcionamiento está basado en el efecto Doppler.

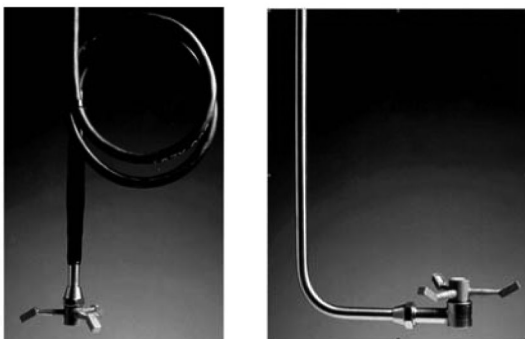


Fig. 5. Fotografía de los dos *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) utilizados en el aforo

Para realizar las mediciones, el aparato se sumerge en el agua, estando las cabezas de los receptores inclinadas 30° respecto al eje del transmisor, de tal

manera que los focos proyectados se interceptan en un punto definiendo así la distancia donde se localiza el volumen de control. El sistema funciona transmitiendo unos pulsos acústicos cortos de frecuencia conocida, que se propagan a través de la columna de agua a lo largo del eje del transmisor. Una parte de la energía acústica se dispersa en las pequeñas partículas suspendidas en el agua, mientras que otra parte retorna y se convierte en estimaciones de velocidad usando una técnica de procesamiento.

Las medidas se realizaron desde una pasarela situada 7 metros aguas arriba del aforador, dividiendo la sección en cinco franjas (S1, S2, S3, S4 y S5), realizándose en el eje de las mismas, cuatro medidas a diferentes alturas (P1, P2, P3 y P4), con el fin de abarcar la mayor parte de sección de agua.

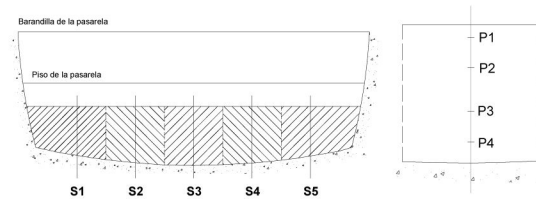


Fig. 6. Secciones y puntos de toma de velocidades

Como el objetivo es establecer la curva de descarga del aforador, se realizaron tomas de datos en los diferentes puntos de cada sección con diferentes caudales estimados de 0,050 – 0,100 – 0,175 – 0,325 – 0,450 – 600 – 800 m<sup>3</sup>/s.

El valor promedio de cada serie registrada con los ADV nos proporcionó la velocidad en el punto de muestreo, lo que permitió obtener un gráfico de la distribución de velocidades en cada una de las franjas verticales de cada sección. Finalmente, para cada sección se obtuvo la velocidad media que multiplicada por el área de la franja vertical dio como resultado el caudal parcial correspondiente a dicha franja. El caudal total se obtuvo como suma de los diferentes caudales parciales.

Una vez realizado el aforo se comprobó que los caudales circulantes eran superiores a los obtenidos de forma teórica por lo que se analizaron las distribuciones de velocidades en perfil y en planta con el fin de obtener una respuesta a esta variación.

En la siguiente figura se indican las distribuciones de velocidad en las diferentes franjas para un caudal teórico de  $Q_{teórico} = 0,175 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observó que las velocidades son diferentes en todas las franjas, existiendo un retardo de más de 2 cm/s entre la franja con más celeridad y distribución uniforme (franja central S3) y la franja con menos celeridad (franja S5). Esto nos indicó irregularidades en el patrón de flujo y, por tanto, el caudal realmente transportado ( $Q_{afo} = 0,181 \text{ m}^3/\text{s}$ ) resultó ser superior al caudal teórico obtenido con las diferentes formulaciones.

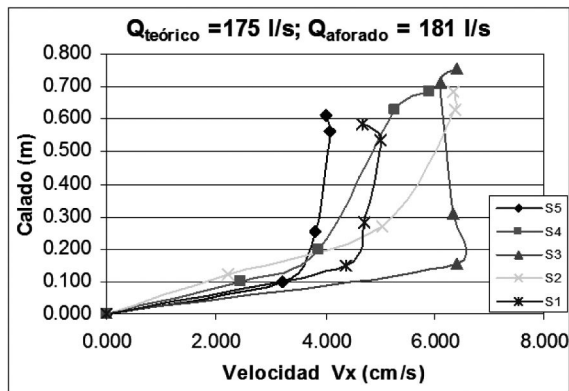


Fig. 7. Distribución de velocidades en las diferentes franjas para un caudal teórico de 0,175 m<sup>3</sup>/s

Al representar la distribución en planta de las velocidades se obtuvo una distribución de velocidad regular hasta el caudal aforado de 0,181 m<sup>3</sup>/s. Para los caudales aforados superiores a 0,345 m<sup>3</sup>/s la distribución de velocidades se convertía en irregular, estando la máxima velocidad media desviada hacia el margen izquierda del aforador (visto desde aguas arriba y en la dirección del flujo).

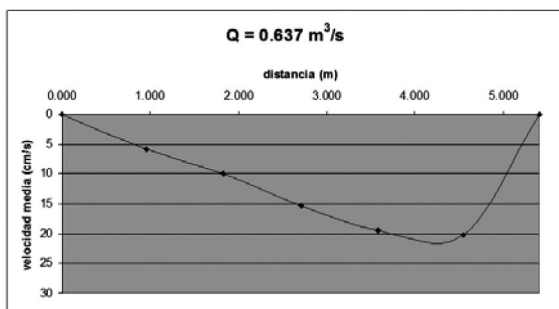
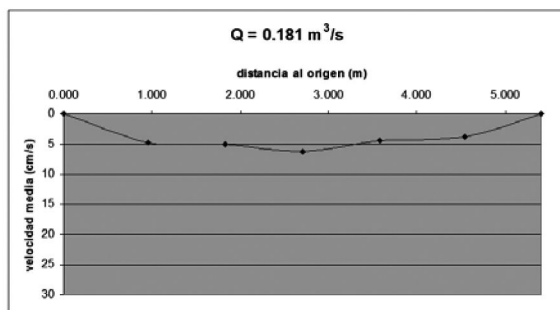


Fig. 8. Distribución en planta de velocidades medias para caudales aforados de 0,181 m<sup>3</sup>/s y 0,637 m<sup>3</sup>/s

## 2.4. Comparación de resultados

Las principales razones que explican la diferencia de los caudales aforados con los obtenidos por métodos teóricos son, por una parte, la deficiente incorporación de los caudales al canal de aforo, produciéndose fuertes aceleraciones y perturbaciones del flujo (especialmente en los grandes caudales) y por otra, la fuerte pendiente del canal de aproximación al aforador (1%). Todo esto, unido a la poca efectividad de los elementos de tranquilización dispuestos produce un funcionamiento anómalo del dispositivo de aforo.

En la figura siguiente se comparan los caudales aforados con los obtenidos con el programa HEC-RAS y la fórmula teórica del USBR. Finalmente, tras los trabajos realizados se adoptó una nueva ecuación de descarga para el vertedero:

$$Q = 4,206 \cdot h^{1.264} \quad (2)$$

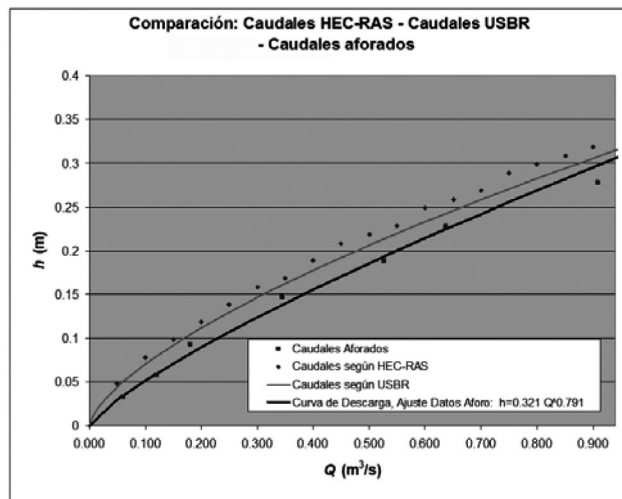


Fig. 9. Curva de descarga adoptada y comparación con las curvas teóricas obtenidas

## 3. Conclusiones

Las condiciones de funcionamiento de un aforador son el elemento clave a la hora de garantizar unas medidas lo más exactas posibles. En el caso mostrado, la disposición de elementos de tranquilización adicionales junto con una mejora de la incorporación del agua al canal redundaría en un funcionamiento más ajustado del aforador a su definición teórica.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Mancomunidad de los Canales del Taibilla toda la colaboración prestada para la realización de este trabajo.

## Referencias

- [1] Bos, M. (1989) *Discharge measurement structures*. 3<sup>rd</sup> ed. Wageningen (Netherlands): International Institute for Land Reclamation and Improvement. ISBN: 90-70754-15-0
- [2] Hydrologic Engineering Center (2010) *HEC-RAS. River analysis system. User's manual*. Davis: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources.
- [3] USBR (2001) *Water measurement manual*. 3<sup>rd</sup> ed. Washington: U. S. Department of Interior