

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016**

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE LA CURVATURA DEL  
FLUJO SOBRE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE FONDO**

*Luis G. Castillo, Juan T. García, José M. Carrillo, Antonio Viguera-Rodríguez*

*Grupo de I+D+i Hidr@m, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, España  
luis.castillo@upct.es, juan.gbermejo@upct.es, jose.carrillo@upct.es, aviguera.rodriguez@upct.es*

**RESUMEN:**

Este trabajo presenta el campo de velocidades medido con un sistema Particle Image Velocimetry (PIV) a lo largo del flujo sobre un sistema de captación con rejillas de fondo. Los valores medidos se comparan con simulaciones numéricas tridimensionales (ANSYS CFX v14.0). La presión dinámica se mide a partir de un tubo de Pitot colocado con inclinaciones de 0 y 22 grados. Los datos de laboratorio se también se comparan con los resultados de las simulaciones numéricas. La campaña de laboratorio se llevó a cabo en una infraestructura construida en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).

Los coeficientes de velocidad y de presión de la ecuación de la energía se calculan y se utilizan para evaluar el perfil de la lámina de agua. También se utilizan para calcular el caudal captado por unidad de longitud de rejilla, utilizando los coeficientes de descarga propuestos por Nosedá (1956),  $C_{qh}(h)$ , y el ajustado en este estudio,  $C_{qH}(x)$ . Los resultados de caudal captado se comparan con los obtenidos a partir de la ecuación de la energía sin el uso de dichos coeficientes.

La distribución de presiones medidas y simuladas se comparan con las desviaciones respecto a la presión hidrostática propuestas por diversos investigadores (Castro-Orgaz y Hager, 2011).

**ABSTRACT:**

This work compares the velocity field over a bottom rack intake system measured by Particle Image Velocimetry (PIV) and simulated with three-dimensional numerical simulations (ANSYS CFX v14.0). Pressures were measured using a Pitot tube with inclinations of 0 and 22 degrees. Results were also compared with simulated values. Laboratory measurements were carried out in a physical device located in the Laboratory of Hydraulic Engineering of the Universidad Politécnica de Cartagena (Spain).

Velocity and pressure coefficients of the energy equation were obtained. These values were used to evaluate the water profile along the racks. In the same way, the derived flow per unit of rack length was obtained using the discharge coefficient proposed by Nosedá (1956),  $C_{qh}(h)$ , and the discharge coefficient adjusted in the hydraulic device,  $C_{qH}(x)$ . Results were compared with those values obtained from the energy equation without discharge coefficients.

Pressure distributions along the flow depth over the rack were compared with pressure deviation terms from hydrostatic pressure profile proposed by several authors (Castro-Orgaz and Hager, 2011).

**PALABRAS CLAVES:** Reja de fondo; Campo de velocidad; PIV; Pitot; CFD.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de captación con rejas de fondo consisten en una serie de rejas situadas en el lecho del cauce, con la intención de captar la máxima cantidad de agua en ríos de montaña, caracterizados por fuertes pendientes y lechos irregulares, en los que se producen grandes caudales de avenida con un importante transporte de sedimentos. La forma adoptada por las barras, así como el espaciado adoptado entre las mismas, conducen a variaciones en el coeficiente de descarga, dando lugar a diferentes rendimientos de caudal captado (Orth et al., 1954; Frank, 1956, 1959; Nosedá, 1956; White et al., 1972; Drobir, 1981, 1999; Bouvard, 1992).

Se trata de un Flujo Espacialmente Variado con caudales decrecientes. Se observa la curvatura de la superficie del agua y de las líneas de corriente, que se traduce en una distribución no hidrostática sobre la reja. Righetti y Lanzoni (2008) comprobaron la relación entre el coeficiente de descarga y el ángulo que forman las líneas de corriente con el plano de la reja tanto en el hueco como entre barrotes. Esta relación ya fue ya contemplada por Mostkow (1957).

De la inclinación de las líneas de corriente también depende la dirección de la fuerza de arrastre actuante sobre los sólidos que transporta el agua, delimitando las zonas de deposición preferente sobre los huecos de la reja (Castillo y Carrillo, 2012; Castillo et al., 2014, 2015, 2016), justificando así el interés de mejorar el conocimiento de la curvatura del flujo sobre los sistemas de captación de fondo.

Diversos autores proponen soluciones analíticas de las ecuaciones bidimensionales de continuidad y de cantidad de movimiento, utilizando con promediados de Reynolds en un volumen de control, bajo las hipótesis de que la componente horizontal de la velocidad varía linealmente respecto a su módulo en cada sección (Nakagawa, 1969), o directamente igual al módulo de velocidad (Castro-Orgaz y Hager, 2011). En ambos casos, se considera el nivel de energía constante. Estas soluciones analíticas obtienen valores de la distribución de presiones no hidrostáticas y valores del perfil de la lámina de agua más aproximadas con respecto a las hipótesis clásicas (Garot, 1939; De Marchi, 1947; Nosedá, 1956), en las que consideran el flujo irrotacional, despreciando la pérdida de energía por fricción y considerando una distribución de presiones hidrostática. Así, para el caso de pendiente longitudinal horizontal, la variación del calado a lo largo de la reja queda:

$$\frac{dh}{dx} = -2mC_{qh} \frac{\sqrt{h(H-h)}}{2H-3h} \quad [1]$$

donde  $h$  es el calado,  $H$  la altura de energía que se considera constante,  $m$  el índice de huecos,  $C_{qh}$  el coeficiente de descarga en función del calado, y  $x$  la coordenada longitudinal.

Otros investigadores (Mostkow, 1957; Nakagawa, 1969; Nasser et al., 1980) presentan medidas en laboratorio de la distribución de presión y valores de los parámetros de Coriolis y Boussinesq, al inicio y final del hueco de fondo, obtenidos con rejas y huecos de fondo de longitud limitada. Estos parámetros dan una idea de la desviación de las velocidades y presiones respecto a las condiciones de distribución de velocidad uniforme e hidrostática de presiones, respectivamente, lo que está relacionado con el caudal captado.

## OBJETIVOS

En este estudio se busca conocer la distribución de velocidades y presiones a lo largo del flujo sobre la reja de fondo para mejorar el conocimiento del coeficiente de descarga y su definición. En el presente trabajo, el campo de velocidades bidimensional en un plano vertical situado en el centro de la hendidura, se ha obtenido mediante un sistema PIV (Particle Image Velocimetry). Los resultados se comparan con los obtenidos mediante la simulación numérica a partir del software de dinámica de fluidos computacional ANSYS CFX v14.0.

Los coeficientes de velocidad y presión,  $\alpha$  y  $\lambda$ , respectivamente, se calculan y son utilizados para evaluar el perfil de la lámina de agua, así como el caudal captado por unidad de longitud de reja. Para este propósito se parte de la ecuación de la energía con las hipótesis de energía constante,  $dH/dx \approx 0$ . Despejando el término  $dh/dx$  y reemplazando la relación del caudal captado, nos quedan las siguientes ecuaciones en función de  $C_{qH}$  (coeficiente de descarga según la altura de energía ajustado en laboratorio) y  $C_{qh}$  (propuesto por Nosedá, 1956):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-\frac{d\lambda}{dx}h^2 + 2C_{qh}m\sqrt{\alpha(H-\lambda h)H} - \frac{d\alpha}{dx}h\frac{(H-\lambda h)}{\alpha}}{3\lambda h - 2H} \quad [2]$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-\frac{d\lambda}{dx}h^2 + 2C_{qh}m\sqrt{\alpha(H-\lambda h)h} - \frac{d\alpha}{dx}h\frac{(H-\lambda h)}{\alpha}}{3\lambda h - 2H} \quad [3]$$

donde la ecuación del caudal captado se puede expresar como:

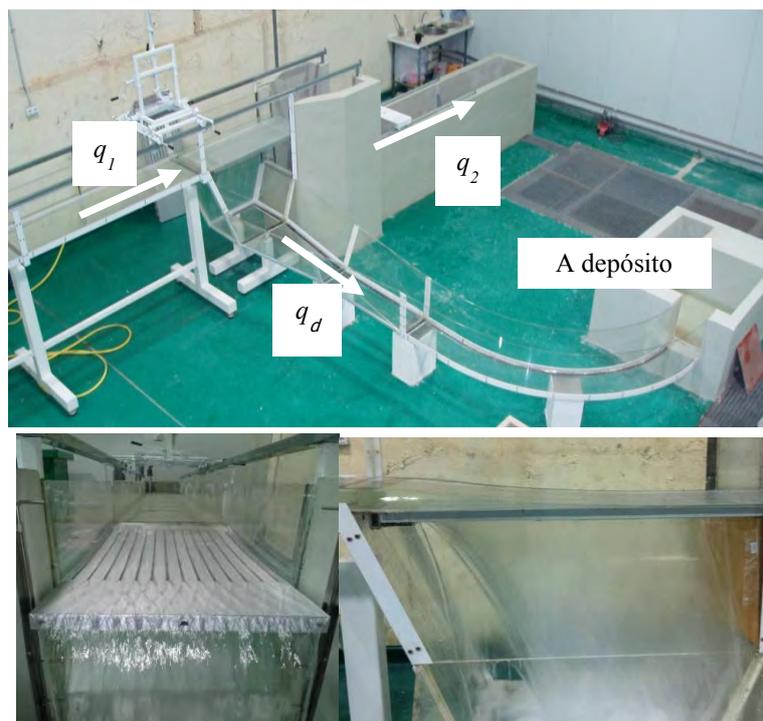
$$\frac{dq}{dx} = -C_{qH}m\sqrt{2gH} \quad [4]$$

$$\frac{dq}{dx} = -C_{qh}m\sqrt{2gh} \quad [5]$$

siendo  $g$  la aceleración de la gravedad.

## INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

El laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) dispone de una infraestructura diseñada para el estudio de los sistemas de captación de fondo. Consistente en un canal de 5,00 metros de longitud y 0,50 m de ancho, al final del cual existe una reja de fondo que puede adoptar diferentes pendientes (Figura 1).



**Figura 1.-** Infraestructura hidráulica para la captación de caudales.

Dispone de un canal de recogida del caudal captado por la reja y de una arqueta de derivación que recoge el agua no captada. El caudal de entrada se mide mediante un caudalímetro electromagnético, mientras que el caudal no captado por la reja se mide mediante un vertedero triangular. Las rejas de 0,90 m de longitud fueron construidas de aluminio con sección transversal en T, disponiéndose de tres espaciamentos entre barras (índice de huecos  $m = 0,16; 0,22$  y  $0,28$ ), como se puede ver en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características geométricas de las rejas.

Barra tipo:	A	B	C
Espacio entre barras, $b_1$ (mm):	5,70	8,50	11,70
Índice de huecos, $m = \frac{b_1}{b_1 + 30}$ :	0,16	0,22	0,28

## INSTRUMENTACIÓN

El sistema PIV (Particle Image Velocimetry) utilizado está formado por una cámara de alta velocidad *Motion Pro HS-3*, con un objetivo de distancia focal de 12,5/75 mm con zoom, adoptando una apertura del objetivo  $f / 11$ , de resolución 520x520 píxeles, 8 bits → 255 tonalidades y una distancia de la cámara al flujo grabado de 0,550 m, aproximadamente. Las ventanas de grabación son alrededor de 9x9 cm. El láser *Oxford Lasers* se ha empleado con una configuración: Retardo de hasta 150  $\mu$ s; duración de destello hasta 10  $\mu$ s; ancho del haz = 5,5 mm y pico de potencia de 200 watts. Su longitud de onda es de 808 nm. Se ha escogido un espacio temporal entre imágenes consecutivas de  $\Delta t = 1/600$  s, un retardo del láser = 30  $\mu$ s; y un pulso de 10  $\mu$ s. Con estas consideraciones se obtiene una relación cm/píxel = 0,017. El agua ha sido sembrada con partículas de poliamida de tamaño medio de 50 micras. Las imágenes se han analizado por parejas mediante una correlación cruzada para una ventana de 64x64 píxeles y con una superposición del 50% (Thielicke y Stamhuis, 2014).

Para la medición puntual de la presión dinámica, se utiliza un tubo de Pitot que se coloca con las inclinaciones de 0 y 22°. Los valores se recogen en un transmisor de presión *Rosemount 2051*, rango de medida de presión diferencial de -62,2 a 62,2 mbar y con precisión de 0,065% del fondo de escala (0,5 mm de precisión), cuyos valores se almacenan en registrador/data logger de 50 Hz de frecuencia y registro de señales analógicas de 4/20 mA.

$$\text{medida\_pitot}_{0^\circ} = (h - y) + \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{U_{x,0^\circ}^2}{2g} + y \quad [6]$$

## SIMULACIÓN NUMÉRICA

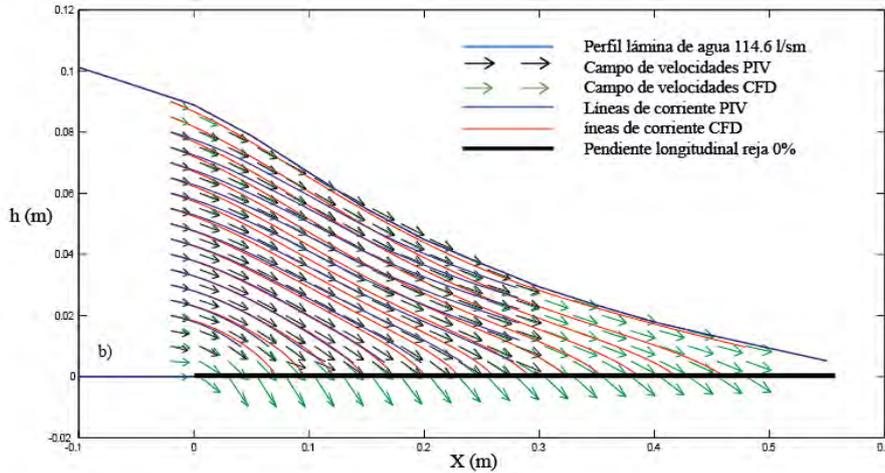
Se ha llevado a cabo una simulación numérica del sistema de captación de fondo mediante ANSYS CFX. El número total de elementos utilizados en la simulación ha sido de aproximadamente 350000 con un tamaño de elemento de 0,004 m. Por simplicidad se consideró que todas las barras trabajan transversalmente de igual forma en la reja por lo que se simplificó el dominio de simulación a tres barras y dos espacios.

Las condiciones de contorno se corresponden con el caudal a la entrada y la turbulencia medidas en laboratorio a una distancia de 0,50 m aguas arriba del inicio de la reja. Se consideraron condiciones de contorno hidrostáticas aguas arriba y aguas abajo de la reja medidos en el canal principal. Para el caudal captado se impuso una condición de contorno abierta.

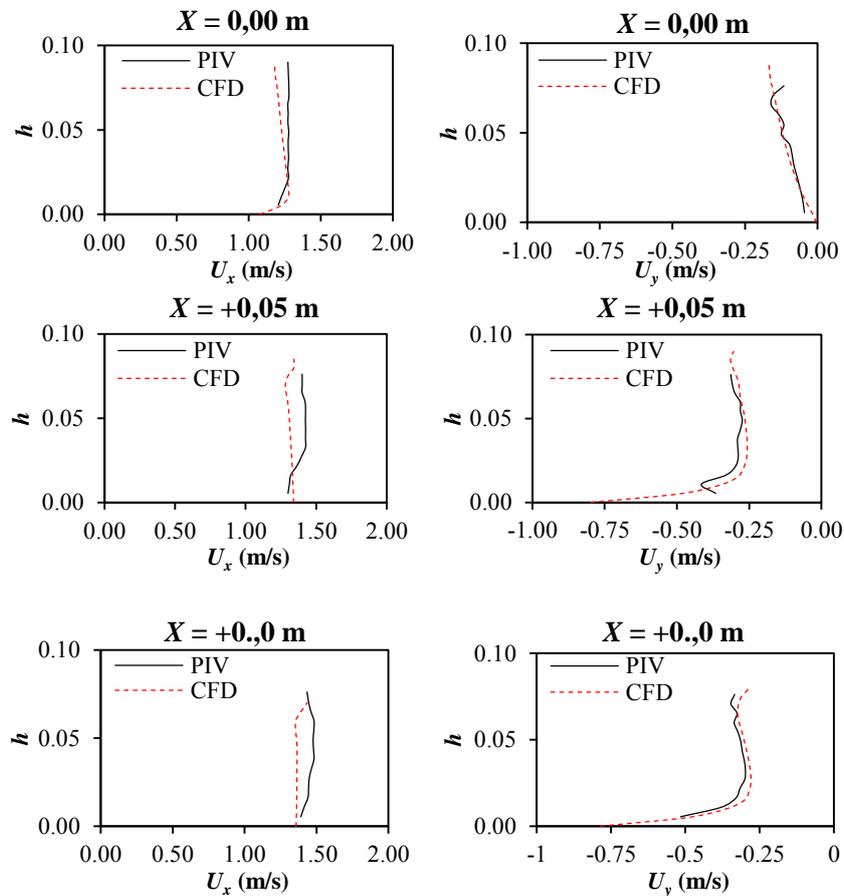
En trabajos anteriores se recoge la adecuación de los resultados entre diversos ensayos simulados y medidos en laboratorio (Castillo y Carrillo, 2012; Castillo et al., 2014, 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

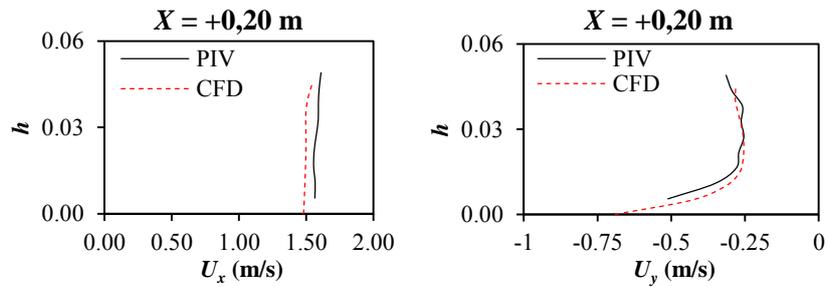
El PIV ha permitido definir el campo de velocidades a lo largo de la reja. Los valores se comparan con los obtenidos a partir de la simulación numérica. La Figura 2 muestra el campo de velocidades junto con las líneas de corriente para el caudal de aproximación  $q_l = 114,6$  l/s/m, índice de huecos  $m = 0.28$  y pendiente horizontal. La Figura 3 compara las velocidades calculadas con PIV y simuladas con CFD para diversas secciones sobre un plano vertical situado en la hendidura. A la vista de dichas figuras se observa que las diferencias máximas se encuentran alrededor del 8%.



**Figura 2.-** Campo de velocidades y líneas de corriente medidas con PIV y calculadas mediante CFD para el caso  $m = 0,28$ ; pendiente horizontal y caudal de aproximación  $q_l = 114,6$  l/s/m.



**Figura 3.-** Componentes horizontal y vertical de velocidad  $U_x$  y  $U_y$ , respectivamente, para las secciones transversales  $X = 0,00$ ;  $0,05$ ;  $0,10$  y  $0,20$  m, medida con PIV y simulada con CFD. Caso  $m = 0.28$ , pendiente horizontal y caudal de aproximación  $q_l = 114,6$  l/s/m.



**Figura 3 Continuación.-** Componentes horizontal y vertical de velocidad,  $U_x$  y  $U_y$ , respectivamente, para las secciones transversales  $X = 0,00; 0,05; 0,10$  y  $0,20$  m, medida con PIV y simulada con CFD. Caso  $m = 0,28$ , pendiente horizontal, y caudal de aproximación  $q_l = 114,6$  l/s/m.

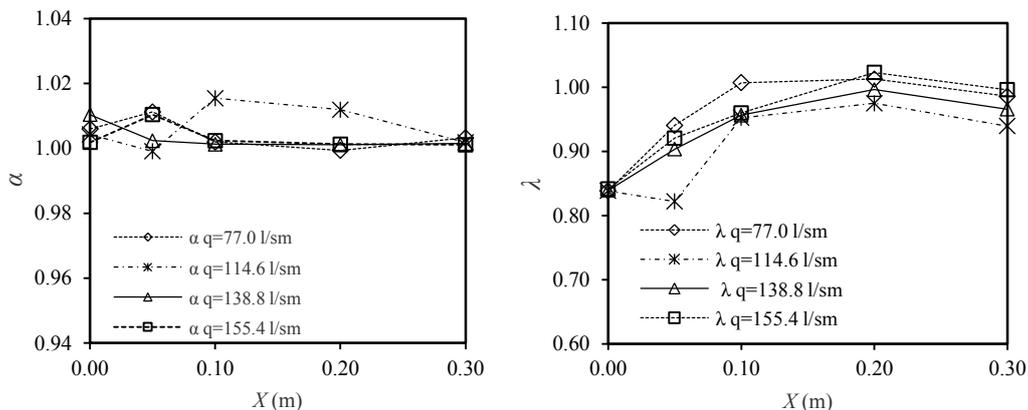
Los coeficientes de velocidad ( $\alpha$ ) y de presión ( $\lambda$ ) de la ecuación de la energía se han calculado integrando numéricamente las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\int U_i^3 dA}{U^3 A} \quad [7]$$

$$\lambda = \frac{1}{qh} \int \left[ \frac{p}{\gamma} + y \right] u dA \quad [8]$$

donde  $U_i$  es la componente horizontal del vector velocidad;  $U$  promedio de la componente horizontal de la velocidad en la sección de cálculo;  $A$  el área mojada del flujo;  $q$  el caudal específico pasante en la sección de cálculo;  $y$  la coordenada vertical en la sección de cálculo; y  $p$  la presión en la coordenada  $y$  de cálculo.

La Figura 4 muestra los coeficientes de velocidad y presión de las ecuaciones [7] y [8] anteriores, para las secciones transversales situadas a diferentes distancias del inicio de la reja y tres caudales de aproximación (77,0; 114,6 y 138,8 l/s/m). Se observa que en general el coeficiente de velocidad es  $\alpha = 1$ , con un valor máximo de  $\alpha = 1,02$ ; lo que constituye una comprobación directa de que la distribución de velocidades es uniforme a lo largo de toda la reja. Los valores del coeficiente de presión  $\lambda$  van desde 0,84 al inicio de la reja, hasta valores muy próximos a la unidad al final, aproximándose así a una distribución hidrostática.



**Figura 4.-** Coeficientes de velocidad ( $\alpha$ ) y de presión ( $\lambda$ ) de la ecuación de la energía, para una sección transversal situada a una distancia  $X$  del inicio de la reja a partir del campo de velocidades calculado.

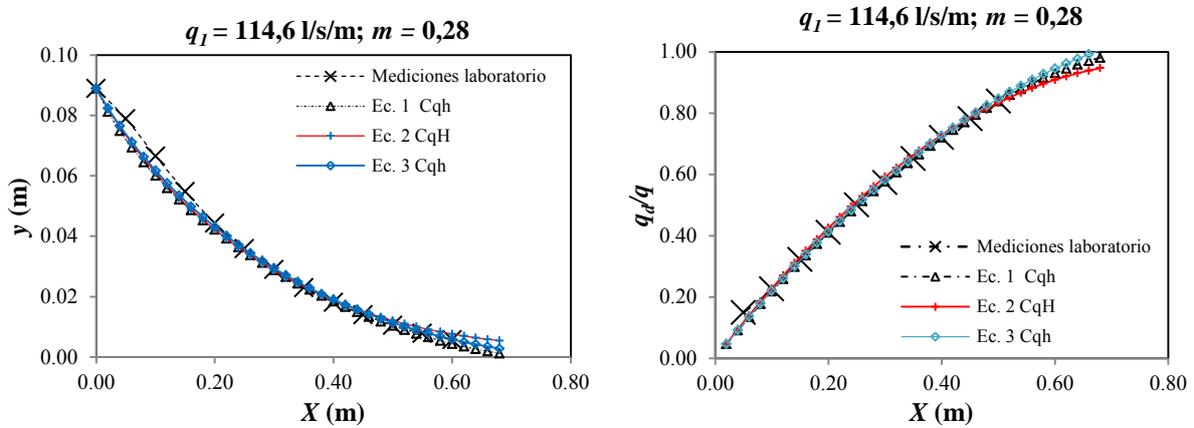
Las ecuaciones diferenciales [2] y [3] se resuelven con el algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden. Para el coeficiente de descarga se utiliza la expresión de  $C_{qh}(h)$  propuesta por Noseda

y la ecuación  $C_{qH}(x)$  obtenida en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (que tiene en cuenta la inclinación del plano de la reja):

$$C_{qh}(h) = 0,66m^{-0,16} \left( \frac{h}{l} \right)^{-0,13} \quad [9]$$

$$C_{qh}(1 + 0,82 \tan \alpha) = -0,2671 \left( \frac{x}{h_c} m \right) + 0,5461 \quad [10]$$

Los resultados de perfil de la lámina de agua y caudal captado acumulado respecto al caudal entrante, se comparan con los obtenidos mediante la Ecuación [1], y se presentan en la Figura 5. Se observa que considerar dichos coeficientes de velocidad y presión no mejora sustancialmente el ajuste logrado, en comparación con el de la Ecuación [1], por estar ya recogidos estos efectos en el coeficiente de descarga.



**Figura 5.** Comparativa de los perfiles de lámina de agua y de la relación del caudal captado acumulado por unidad de longitud, obtenidos mediante las ecuaciones 1, 2, y 3. Caudal 114,6 l/s/m y  $m = 0,28$ .

En la Figura 6 se presenta la distribución de presiones en el plano vertical de la hendidura. Se comparan las presiones obtenidas de la simulación CFD, con las medidas a partir del tubo de Pitot, empleando las velocidades medidas con PIV para resolver la Ecuación [6]. Las presiones se comparan con las desviaciones de la presión hidrostática propuestas por Castro-Orgaz y Hager (2011):

$$\Delta p = \frac{U^2}{2g} (hh'' - h'^2) \left( 1 - \frac{y^2}{h^2} \right) + \frac{U^2}{g} \left[ - \left( \frac{q'h}{q} \right)^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{h} + \frac{y^2}{2h^2} \right) \right] + \frac{U^2}{g} \left[ \frac{q'hh'}{q} \left( \frac{5}{4} - \frac{3y}{2h} + \frac{y^2}{4h^2} \right) \right] \quad [11]$$

donde  $\Delta p$  es la desviación de presión respecto a la presión hidrostática medida en metros;  $g$  la aceleración de la gravedad,  $q' = dq/dx$  el caudal captado,  $h$  el calado medido perpendicularmente al plano de la reja;  $h' = dh/dx$  la pendiente de la superficie de la lámina de agua, y  $h'' = d^2h/dx^2$  la curvatura del perfil de la lámina de agua. De la ecuación anterior, separamos cada uno de los términos denominándolos  $\Delta p I$ ,  $\Delta p II$ ,  $\Delta p III$  y la suma de todos como  $\Sigma \Delta p$ , quedando:

$$\Delta p I = \frac{U^2}{2g} (hh'' - h'^2) \left( 1 - \frac{y^2}{h^2} \right) \quad [12]$$

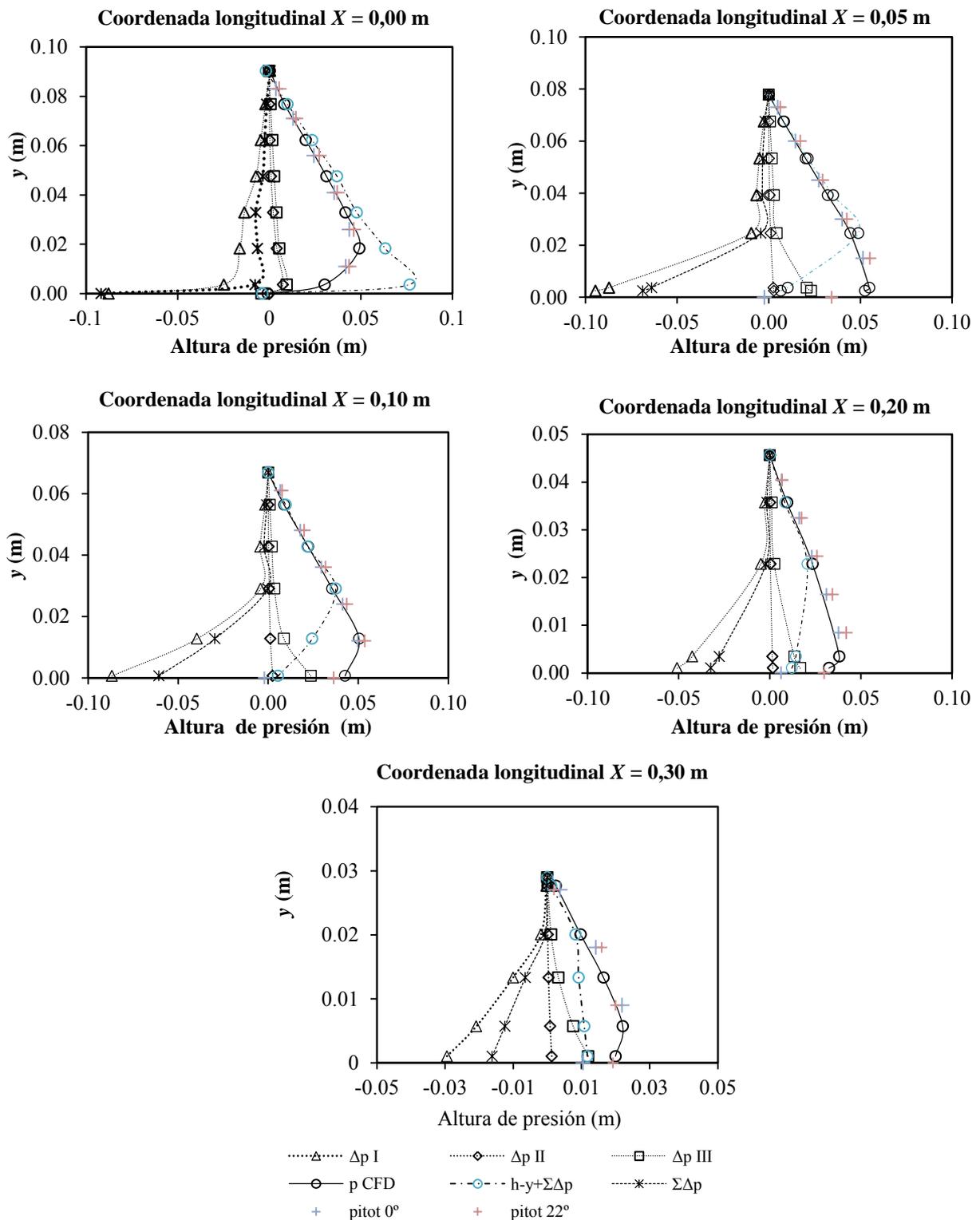
$$\Delta p II = \frac{U^2}{g} \left[ - \left( \frac{q'h}{q} \right)^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{y}{h} + \frac{y^2}{2h^2} \right) \right] \quad [13]$$

$$\Delta p III = \frac{U^2}{g} \left[ \frac{q'hh'}{q} \left( \frac{5}{4} - \frac{3y}{2h} + \frac{y^2}{4h^2} \right) \right] \quad [14]$$

$$\Sigma \Delta p = \Delta p I + \Delta p II + \Delta p III \quad [15]$$

A continuación se calcula el valor de cada uno de los términos presentados en las ecuaciones anteriores, para diferentes secciones y alturas dentro de la lámina de agua. En la Figura 6, se

representa el valor de la presión en cada uno de los puntos simulados con CFD,  $p_{CFD}$ , así como la presión obtenida a partir del valor de la presión dinámica medida con tubo de Pitot y, haciendo uso de los valores del campo de velocidades medido con PIV.



**Figura 6.** Distribución de presiones según la ecuación [11] así como las medidas con Pitot y simuladas con CFD, para diversas secciones y caudal 114,6 l/s/m.

A la vista de la Figura 6 se observa que conforme nos aproximamos a la rejilla el término  $h-y+\Sigma\Delta p$  se aleja de los valores  $p_{CFD}$  y  $p_{pitot}$ . Dicha diferencia se podría deber al término de las

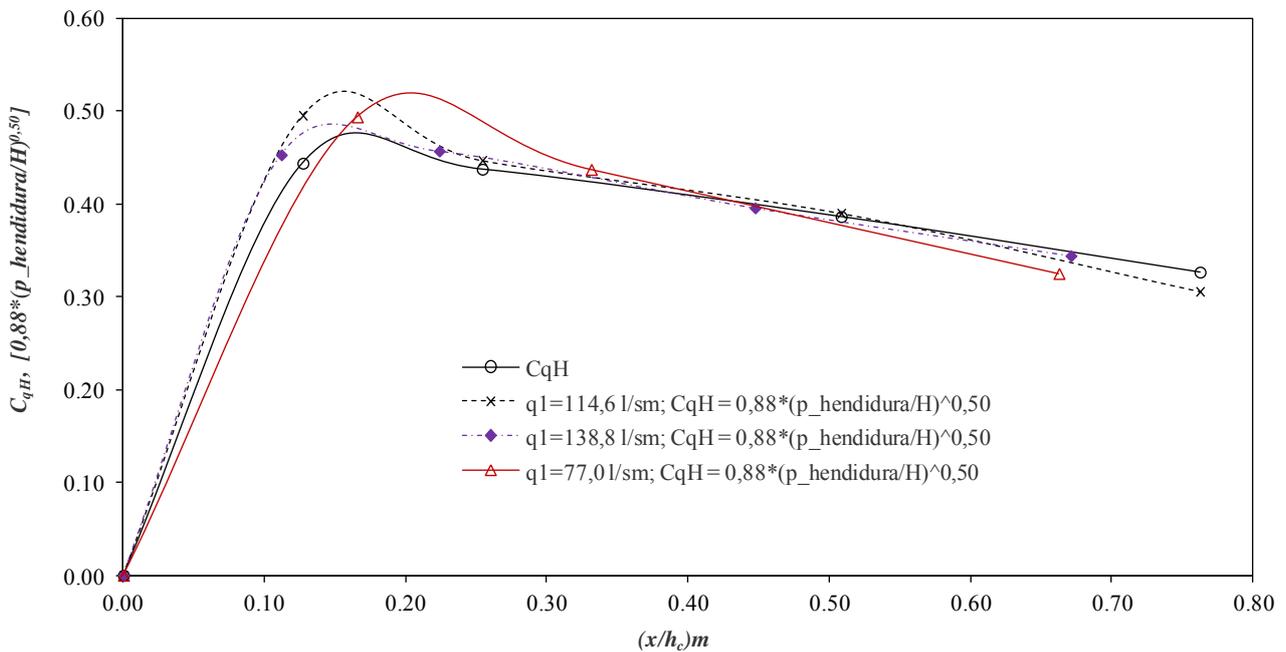
tensiones de Reynolds, que se incluiría en la ecuación de momentum vertical, dentro del sistema de ecuaciones propuesto por Castro-Orgaz y Hager (2011). Así el sistema de ecuaciones quedaría:

$$\frac{1}{g} \left( U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial y} - \cos \theta + \frac{\nu_{t(x,y,z)}}{g} \left( \frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right) \quad [16]$$

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0$$

donde  $\nu_{t(x,y,z)}$  es la viscosidad cinemática turbulenta.

Si representamos gráficamente la presión en la hendidura (presión para  $y = 0$  en el centro del espacio entre dos barras),  $p_{hendidura}$ , a lo largo de la coordenada adimensional  $[(x / h_c) m]$  y una relación adimensional entre las energías de presión en la hendidura del plano y la energía total al inicio de la reja,  $[K * (p_{hendidura}/H)^{0.5}]$ , observamos que dicha relación se aproxima al valor del coeficiente de descarga,  $C_{qH}$ , cuando  $K \sim 0.88$ ; tal como puede verse en la Figura 7.



**Figura 7.-** Valores de  $C_{qH}$  y  $[0,88 * (p_{hendidura}/H)^{0,50}]$  a lo largo de la reja, para los caudales  $q_1 = 77,0; 114,6; 138,8 \text{ l/s/m}$  y reja con índice de huecos  $m = 0,28$ .

## CONCLUSIONES

Definir el campo de velocidades del flujo sobre un sistema de captación de rejillas de fondo se considera de interés a la hora de poder evaluar la capacidad de dicho sistema para derivar un caudal, así como para poder definir el fenómeno de oclusión de sólidos sobre la reja.

Se ha utilizado un sistema PIV (Particle Image Velocimetry) para medir el campo de velocidades en una infraestructura hidráulica existente en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena. También se ha llevado a cabo la simulación numérica mediante un código de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

El conocimiento de los coeficientes de velocidad y presión de la ecuación de la energía quedan ya recogidos dentro del ajuste realizado a través del coeficiente de descarga.

En una primera aproximación, las alturas de presión calculadas con CFD y medidas con tubo de Pitot, muestran diferencias con los resultados obtenidos a través de métodos teóricos propuestos que no tienen en cuenta las tensiones viscosas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación procedente de la Fundación Séneca de la Región de Murcia (España) a través del proyecto “Optimización de los sistemas de captación de fondo para zonas semiáridas y caudales con alto contenido de sedimentos. Definición de los parámetros de diseño”. Referencia: 19490/PI/14.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ANSYS Inc.** (2010). *ANSYS CFX. Solver Theory Guide. Release 13.0.*

**Castillo, L.G. and Carrillo, J.M.** (2012). “Numerical simulation and validation of intake systems with CFD methodology”, Proc. 2nd IAHR European Congress, 2012.

**Castillo, L.G.; García, J.T. and Carrillo, J.M.** (2014). “Experimental measurements of flow and sediment transport through bottom racks. Influence of gates sizes on the rack”. Proc. International Conference on Fluvial Hydraulics (RIVER FLOW), Lausanne, Switzerland, 3-5 September 2014.

**Castillo, L.G.; García, J.T. and Carrillo, J.M.** (2015). “Intake systems in ephemeral rivers”. Proc. Eight River Basin Management, Wessex Institute of Technology, 117-128, 2015.

**Castillo, L.G.; García, J.T. and Carrillo, J.M.** (2016). “Experimental and numerical study of bottom racks occlusion by flow with gravel-sized sediments. Application to ephemeral streams in semi-arid regions”. Journal of Water, (In review).

**Castro-Orgaz, O. and Hager, W. H.** (2011). “Spatially-varied open channel flow equations with vertical inertia”. Journal of Hydraulic Research, 49:5, 667-675

**De Marchi, G.** (1947). “Profili longitudinali della superficie libera delle correnti permanenti lineari con portata progressivamente crescente o progressivamente decrescente entro canali di sezione costante”. Ricerca scientifica e ricostruzione.

**Drobir, H.** 1981. “Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge”. In, Österreichische Wasserwirtschaft: 11(12): 243-253.

**Drobir, H.,** Kienberger, V., and Krouzecky, N.: “The wetted rack length of the Tyrolean weir”, Proc. 28th IAHR Congress, 1999.

**Frank, J.** (1956). “Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr”, Der Bauingenieur, 31(3), 96-101, 1956.

**Frank, J.** (1959). “Fortschritte in der hydraulik des Sohlenrechens”, Der Bauingenieur, 34, 12-18, 1959.

**Garot, F.** (1939). “De Watervang met liggend rooster”, De Ingenieur in Nederlandsch Indie, 1939.

**Mostkow, M.** (1957). “Sur le calcul des grilles de prise d'eau”, La Houille Blanche, 4, 569-576, 1957.

**Nakagawa, H.** (1969). *On Hydraulic performance of bottom diversion Works.* Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

**Nasser, M. S., Venkataraman, P. and Ramamurthy A. S.** (1980): “Flow in a channel with a slot in the bed”, Journal of Hydraulic Research, 18:4, 359-367

**Nosedo, G.** (1956) “Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo”. L'Energia Elettrica, 565-581, 1956.

**Orth, J., Chardonnet, E., and Meynardi, G.** (1954). “Étude de grilles pour prises d'eau du type”, La Houille Blanche, 3, 343-351, 1954.

**Righetti, M. and Lanzoni, S.** (2008) “Experimental study of the flow field over bottom intake racks”. Journal of Hydraulic Engineering, 134(1), 15-22, 2008.

**Thielicke, W. and Stamhuis, E. J.** (2014): PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.4). <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>

**White, J.K., Charlton, J.A. and Ramsay, C.A.W** (1972) “On the design of bottom intakes for diverting stream flows”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, 51:337-45.