

# **Comparativa del flujo de agua limpia y con sedimentos a través de sistemas de captación de fondo utilizando datos de laboratorio y un modelo CFD**

**Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo**  
*Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hidr@m*

## **1. Resumen**

Los sistemas de captación de fondo consisten en una serie de rejillas situadas en el lecho del cauce con la intención de que el agua captada pase a través de las mismas. Estas estructuras son utilizadas en ríos de montaña, con fuertes pendientes y lechos irregulares, en los que existe un importante transporte de sedimentos y caudales de avenida. Las rejillas se diseñan para captar la mayor cantidad de agua posible a la vez que deben retener la menor cantidad de sólidos. Actualmente, existen algunos estudios acerca del grado de oclusión de la rejilla como consecuencia de la deposición de sólidos sobre éstas, o de la cantidad de sedimentos que se introducen en el sistema de rejillas y son transportados a lo largo del canal de derivación. Uno de los objetivos de los estudios que se está llevando a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) es optimizar este tipo de sistemas de captación para utilizarlos en flujos torrenciales y discontinuos con una elevada concentración de sedimentos. Este trabajo compara los resultados de sistemas de rejillas obtenidos en laboratorio y con simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para situaciones de flujo con agua clara y con transporte de sedimentos.

## **2. Modelación con agua clara**

### **2.1 Modelo físico de la UPCT**

En el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena se dispone de una infraestructura diseñada para el estudio de sistemas de captación de fondo (fig. 1). Consistente en un canal de 5 metros de longitud y 0.50 m de ancho. En el tramo final se dispone de una rejilla que puede adoptar diferentes pendientes, pudiéndose modificar el tipo de barrotes y el espaciamiento entre ellos. El caudal captado por la rejilla es recogido por un canal lateral y transportado por una conducción en régimen supercrítico hacia un depósito de almacenamiento. El caudal de ensayo se controla mediante un caudalímetro electromagnético, mientras que los caudales no captados por la rejilla se miden mediante un

vertedero triangular. Las rejas han sido construidas con perfiles de sección transversal tipo T de aluminio, y una longitud 0.90 m. Se han analizado tres espaciamientos entre las barras, obteniéndose diferentes índice de huecos  $m = \text{sección hueca}/(\text{sección sólida} + \text{sección hueca})$ , (0.16; 0.22 y 0.28). Los caudales específicos analizados son 53.8; 77.0; 114.6; 155.4 l/s/m.



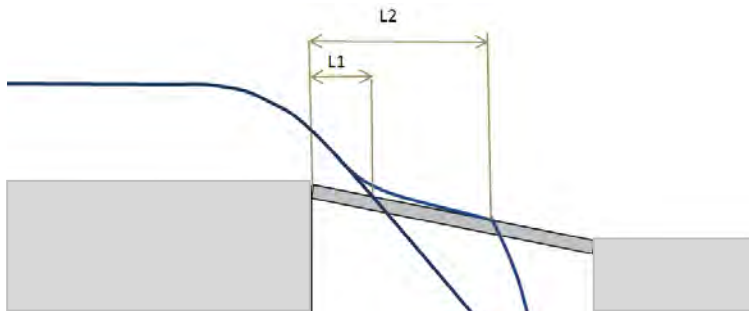
**Figura 1.** Infraestructura para el estudio de sistemas de captación de fondo de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Para cada ensayo, se han medido tanto el perfil adoptado por la lámina de agua como los caudales captados y no captados por la reja por unidad de longitud.

## 2.2 Modelo físico de Drobir

Drobir et al. (1999) midieron la longitud de reja mojada (en proyección horizontal) en un modelo a escala 1:10. La reja se componía de barras de sección transversal circular de diámetro 0.1 m, espaciamiento entre barras de 0.15 m y pendiente del 20%. Los caudales específicos utilizados estaban entre 0.25 y 2.00 m<sup>3</sup>/s/m.

Se consideran dos longitudes representativas (fig. 2):  $L_1$  es la proyección horizontal de la distancia desde el inicio de la reja hasta el punto donde la lámina de agua cruza el eje de la barra (medida entre barras);  $L_2$  es la proyección horizontal de la máxima distancia desde el inicio de la reja hasta donde las barras están mojadas.



**Figura 2.** Esquema de la longitud de reja mojada  $L_1$  y  $L_2$  (Drobir et al., 1999).

## 2.3 Modelo numérico

FLOW-3D utiliza un esquema de resolución en diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales de Navier Stokes, aplicando la técnica de volúmenes de control a la malla del dominio del flujo. Las ecuaciones de continuidad y momento son:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [1]$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (P\delta_{ij} + \rho \overline{u_i u_j}) \quad [2]$$

donde  $P$  es la presión dinámica,  $\rho$  la densidad de flujo,  $u_i$  la componente  $i$  de la velocidad local promediada del flujo,  $\delta$  la función delta de Kronecker y  $\overline{\rho u_i u_j}$  las tensiones de Reynolds.

Para complementar la solución numérica, se ha utilizado el modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$  (Yakhot y Smith, 1992).

Las condiciones de contorno del modelo son el caudal de ensayo, los calados y las distribuciones de presiones hidrostáticas aguas arriba y aguas abajo de la reja. Debido a que no se cumple la condición de presión hidrostática, en la condición de salida del caudal captado por la reja se consideran condiciones de contorno de salida libre.

Con el fin de adaptar el modelo a la geometría de la reja, se ha considerado un tamaño de malla de 0.008 m en el modelo de laboratorio de la UPCT, y de 0.025 m para el caso de la reja de Drobir, simulado en escala de prototipo.

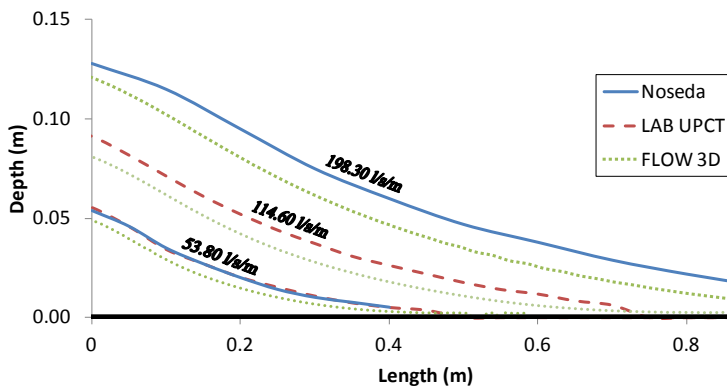
## 2.4 Resultados y discusión

### 2.4.1 Modelo físico de la UPCT

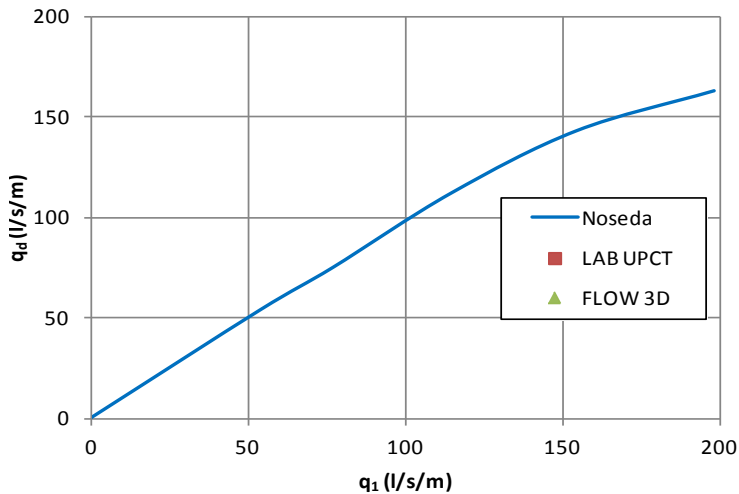
Se han comparado los resultados obtenidos mediante simulación numérica, con los medidos en el modelo de Nosedá (1956) y en el laboratorio de la UPCT.

La figura 3 compara el perfil longitudinal de la lámina de agua para tres caudales distintos, para el espaciamiento  $b_1 = 8.5$  mm ( $m = 0.22$ ) y posición horizontal. En general, los perfiles de la lámina de agua obtenidos con CFD son similares a las medidas de laboratorio. En la parte central de la reja las diferencias de FLOW-3D alcanzan el 15% de los valores medidos por Nosedá cuando se considera el mayor caudal específico.

En la figura 4 se compara la relación entre el caudal específico entrante,  $q_1$ , y el caudal específico captado por la reja,  $q_d$ , considerando un espaciamiento de  $b_1 = 8.5$  mm. Los resultados de FLOW-3D son muy similares a los medidos en el laboratorio de la UPCT y a las medidas de Nosedá, salvo para  $q_1 = 198.3$  l/s/m donde el modelo numérico tiende a captar más caudal.



**Figura 3.** Perfil de la lámina de agua sobre el centro de la barra para  $b_1 = 8.50 \text{ mm}$  y  $q_1 = 53.8$ ;  $114.6$  y  $198.30 \text{ l/s/m}$ .



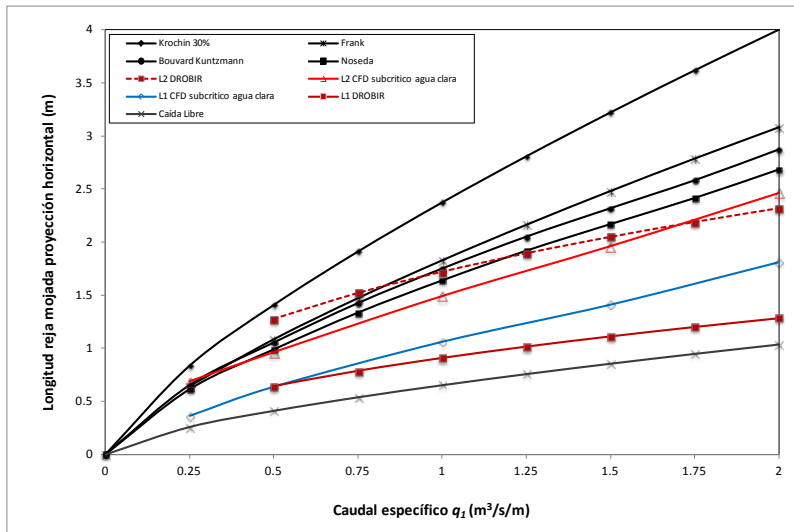
**Figura 4.** Capacidad de derivación del sistema de captación, considerando  $b_1 = 8.50 \text{ mm}$  ( $m = 0.22$ ).

## 2.4.2 Modelo físico de DROBIR

La figura 5 muestra las longitudes de reja mojadas  $L_1$  y  $L_2$  simuladas para diferentes caudales específicos y calculadas aplicando las metodologías de Bouvard (1953), Bouvard y Kuntzmann (1954), Frank (1956) y Nosedo (1956). En los cálculos se ha utilizado la formulación del coeficiente de descarga,  $C_q$ , para reja horizontal y aproximación en flujo subcrítico propuesta por Nosedo (recogido en Castillo y Lima 2010):

$$C_q = 0.66m^{0.16} \frac{h}{l}^{0.13} \quad [3]$$

donde  $l$  es la separación entre ejes de barras,  $m$  es el índice de huecos y  $h$  es el calado medido en dirección vertical.



**Figura 5.** Longitud de reja mojada (proyección horizontal) para una pendiente del 20% y  $m = 0.60$ .

En general, el modelo numérico obtiene una buena aproximación para ambas longitudes. Para los caudales mayores la longitud  $L1$  calculada con CFD tiende a ser mayor que el resto de valores.  $L2$  tiende a ser menor que los resultados de las formulaciones empíricas. Estas desviaciones pueden ser debidas a que el método usado por FLOW-3D para definir la parte sólida de un modelo tiene algunas dificultades para capturar las formas circulares de las barras. Por otro lado, también podría deberse a que el tamaño de malla empleado (0.025 m) es demasiado grueso para reproducir los reducidos calados sobre las barras en el tramo final (menores de 0.01 m).

### 3. Modelación con sedimentos

#### 3.1 Modelo físico

Se han realizado mediciones en prototipo con sedimentos Drobir (1981). Sin embargo, el modelo físico de Nosedá (1956) no ha sido aun estudiado en este sentido.

#### 3.2 Características de los sedimentos

Se han llevado a cabo dos modelaciones numéricas con sedimentos. Una a partir del modelo a escala de laboratorio de la UPCT en la que se han utilizado arenas con un  $d_{50} = 5$  mm, limos de  $d_{50} = 1 \times 10^{-2}$  mm y una mezcla de ambos materiales en la misma proporción. Al inicio de la reja se han considerado concentraciones de sedimentos en volumen que varían entre 1 y 10%. La otra simulación, a partir del prototipo de Drobir (1981), considerando arenas de  $d_{95} = 60$  mm definidas por Sommer (citado por Drobir, 1981). Para este caso, se han simulado concentraciones en volumen al inicio de la reja entre el 1 y el 5%.

### 3.3 Modelo numérico

El modelo de sedimentos considera dos situaciones: movilización de partículas y transporte. La primera tiene lugar en la interfase entre la superficie líquida y sólida. El transporte se inicia cuando el esfuerzo que actúa sobre el fondo supera un valor crítico, proporcional a la tensión de corte. La componente de transporte simula el movimiento de las partículas sólidas en el fluido. Adicionalmente, el modelo incorpora un módulo para simular el arrastre de fondo. La densidad y la viscosidad del fluido se calculan a partir de la concentración de sedimentos.

### 3.4 Resultados y discusión

#### 3.4.1 Modelo numérico de la UPCT

Las rejas originales de UPCT y de Noseda son de 0.90 m de longitud, superiores a la longitud necesaria para los caudales simulados (Castillo y Carrillo, 2012). Por este motivo, para el estudio con sedimentos se decidió simular rejas de 0.50 m. De esta forma se consigue apreciar la variación del caudal captado con diferentes concentraciones de sedimentos (Castillo et al. 2013).

La figura 6 muestra los resultados del caudal recogido en el sistema de rejas en función del caudal de aproximación para un espaciamiento de 5.7 mm ( $m = 0.16$ ). Para una concentración de sedimentos del 10%, en el caso del mayor caudal, el caudal captado se reduce a aproximadamente el 50% del caudal que se captaría si la reja tuviese una longitud adecuada.

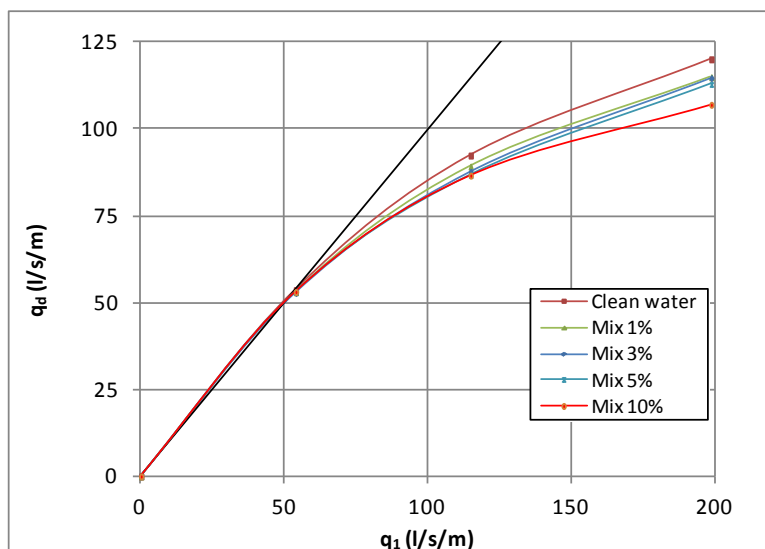
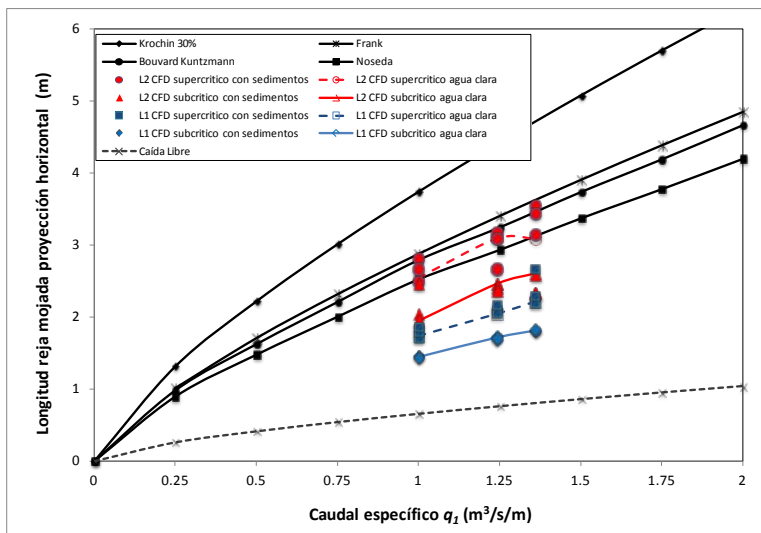


Figura 6. Capacidad de captación para  $b_1 = 5.70$  mm,  $m = 0.16$  y  $L = 0.50$  m.

### 3.4.2 Modelo numérico de DROBIR

Para cada simulación se ha calculado el valor de las longitudes mojadas  $L1$  y  $L2$ , variando la concentración de sedimentos entrantes y comparándolas con los resultados obtenidos en agua clara. Los caudales simulados de 1.00, 1.24 y 1.36  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  se corresponden a los caudales específicos definidos por Hofner (citado por Drobir, 1981) cuando midió el volumen de sedimentos retenido en un desarenador situado aguas abajo del sistema de captación.

En la figura 7 se observa que la longitud de reja mojada se incrementa con la concentración entrante de sedimentos, así como con aproximaciones en régimen supercrítico, requiriendo una mayor longitud de reja para captar el mismo caudal específico.



**Figura 7.** Longitudes de reja mojada (proyección horizontal) para una pendiente del 20%,  $m = 0.375$ , considerando diferentes concentraciones de sedimentos (1.00, 2.50 y 5.00 %).

## 4. Conclusiones

Existen diferentes estudios experimentales que miden el flujo de agua clara a través de sistemas de captación de fondo, considerando diferentes formas, pendientes y espaciamientos. Por el contrario, son escasos los estudios que recogen los efectos del transporte de sedimentos sobre las rejillas.

Para mejorar el conocimiento en este tipo de estructuras, es necesario llevar a cabo mediciones experimentales, tanto en modelo como en prototipo, analizando calados, velocidades y tasas de sedimentos.

En este trabajo se ha analizado la adecuación de los resultados numéricos de simulaciones CFD a los valores experimentales obtenidos para agua clara en dos modelos. Además, se ha llevado a cabo un estudio numérico preliminar considerando transporte de sedimentos.

La longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal se ve incrementada debido a la interacción del flujo con los sedimentos. El tipo de flujo de aproximación influye en los cálculos de longitud de reja mojada. Se aconseja considerar condiciones de aproximación de flujo supercrítico y subcrítico para calcular la longitud necesaria de reja.

Los resultados de laboratorio permitirán calibrar y validar los códigos CFD, tanto en agua clara como con sedimentos.

## Referencias

- Bouvard, M., 1953. Débit d'une grille par en dessous. *La Houille Blanche* (2) 290-291. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1953027>.
- Bouvard, M. and Kuntzmann, J., 1954. Étude théorique des grilles de prises d'eau du type. En dessous. *La Houille Blanche* (5) 569-574 (in French). <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1954049>.
- Castillo, L.G. and Lima, P., 2010. Análisis del dimensionamiento de la longitud de reja en una captación de fondo. Proceedings of the XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Castillo, L. & Carrillo, J.M., 2012. Numerical simulation and validation of intake systems with CFD methodology. Proceedings of the 2nd IAHR European Congress. Munich, Germany.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M. and García, J.T., 2013. Comparison of clear water flow and sediment flow through bottom racks using some lab measurements and CFD methodology. Seven River Basin Management. Wessex Institute of Technology, New Forest, UK.
- Drobir, H., 1981. Entwurf von Wasserfassungen im Hochgebirge. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Heft, 11(12). ISSN: 0029-9588.
- Drobir H., Kienberger, V., and Krouzecky, N., 1999. The wetted rack length of the Tyrolean weir. IAHR- Proceedings of the 28th Congress, Graz, Austria.
- FLOW Science, Inc., 2011. FLOW 3D. Theory v10.0.
- Frank, J., 1959. Fortschritte in der hydraulik des Sohlenrechens. *Der Bauingenieur*, 34, 12-18.
- Frank, J., 1956. Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr. *Der Bauingenieur*, 31, Helf 3. 96-101.
- Krochin, S., 1978. Diseño Hidráulico. Segunda Edición. Colección Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.
- Noseda, G., 1956. Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. *L'Énergie Elettrica*, 565-581.
- Yakhot, V. and Smith, L.M., 1992. The renormalization group, the  $\epsilon$ -expansion and derivation of turbulence models. *Journal of Scientific Computing*, 7(1), 35-61. Print ISSN 0885-7474.