

Diseño de sistemas de captación de fondo

Juan T. García^a, Luis G. Castillo^a, Patricia L. Haro^b, José M. Carrillo^a

^a Grupo Hidr@m, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena, Paso Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España; juan.gbermejo@upct.es; luis.castillo@upct.es; jose.carrillo@upct.es.

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
patricia.haro@epn.edu.ec

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

La longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal en un sistema de captación de fondo depende de factores como: el tipo de barra —circulares o planas—, el espaciamiento entre barras y la pendiente adoptada por la reja. Este trabajo recoge la campaña experimental realizada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) sobre un dispositivo de captación utilizando dos configuraciones de rejillas de sección circular, longitudinalmente dispuestas a la corriente, cuyos índices de huecos (relación área hueca respecto a área total) $m = 0.28$ y 0.60 . Se han considerado el calado al inicio de la reja y la longitud de captación, obtenidos en 237 casos con diversos caudales entrantes y pendientes adoptadas entre 0 y 33%. Las variables adimensionales más influyentes en este tipo de flujo permiten la obtención de un ajuste de regresión lineal múltiple.

Palabras clave | Rejas de fondo; Longitud de reja; regresión lineal múltiple; análisis de sensibilidad.

INTRODUCCIÓN

Los ríos de montaña se caracterizan por tener pendientes longitudinales elevadas, grandes variaciones de caudal, debido a lluvias intensas de corta duración, y un alto contenido de sedimento con escasos finos (Krochin, 1978). Las zonas semiáridas, en cambio, se caracterizan por tener escasas precipitaciones y gran variabilidad espacio – temporal, baja humedad de los suelos, escasez de cubierta vegetal, morfología abrupta y escorrentías con gran capacidad de transporte de sedimentos (García, 2016). En las cuencas con ríos de montaña, se han utilizado las captaciones de fondo denominadas tirolesas o caucásicas por su capacidad para captar la mayor cantidad de caudal líquido con un contenido mínimo de sedimentos, lo cual otorga a este tipo de captaciones, ventajas desde el punto de vista de la operación y el mantenimiento frente a otros tipos de sistema de captación cuando se ubican en lugares de difícil acceso (Krochin, 1978). En las cuencas semiáridas se plantea la implementación de sistemas de reja de fondo en las partes altas para captar caudales de escorrentía en tiempo de lluvias. Sin embargo, la alta capacidad de arrastre de sedimentos en este tipo de cuencas, precisa del estudio detallado de los parámetros de diseño a fin de optimizar el dimensionamiento de la estructura y garantizar la captación de caudales de avenida para los casos de elevado transporte de sólidos (Castillo y Lima, 2010; Castillo et al., 2013, 2014, 2016; García, 2016).

Actualmente, en la literatura técnica, existen diversas formulaciones que proponen longitudes de reja necesarias para derivar un determinado caudal en un sistema de captación de fondo (Castillo et al., 2017; Carrillo et al., 2017). Estas formulaciones proceden de trabajos experimentales en laboratorio y en prototipo cuyas formulaciones, así como las condiciones de laboratorio en las que se obtuvieron, se recogen en el Apéndice. Dichas formulaciones se resumen en las Figuras 1 y 2 para los casos concretos de pendiente 20%, índices de huecos $m = 0.28$, con separación entre barras $b_l = 0.0389$ m y ancho de la barra maciza $b_w = 0.10$ m; y $m = 0.60$ para $b_l = 0.15$ m y $b_w = 0.10$ m. Se indica además si las formulaciones fueron desarrolladas para barras planas con forma de T, prismáticas, circulares o prismáticas con coronación redondeada. En el caso del

índice de huecos $m = 0.60$ (Figura 2), los valores se pueden comparar también con los datos medidos en prototipo para el caso de barras circulares y pendiente del 20% (Drobir, 1999).

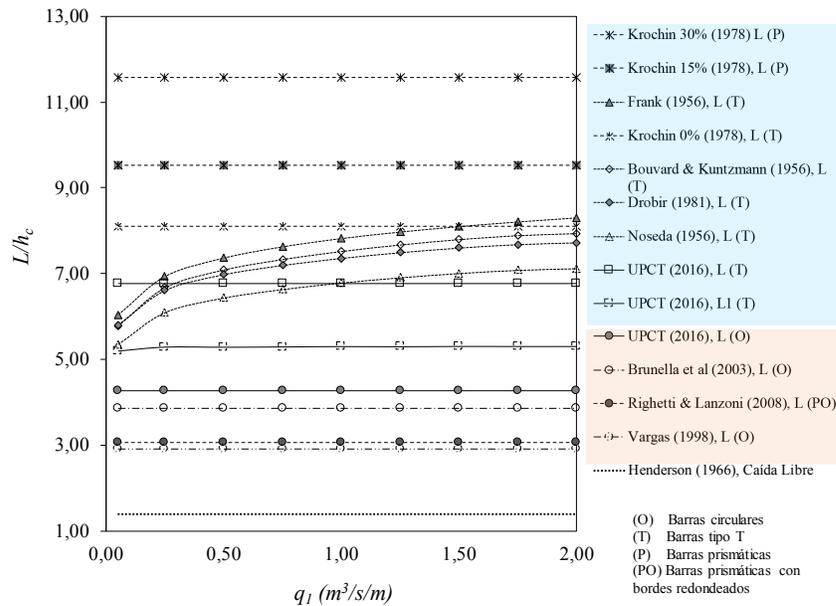


Figura 1 | Relación longitud de reja y calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.28$ y pendiente del 20%.

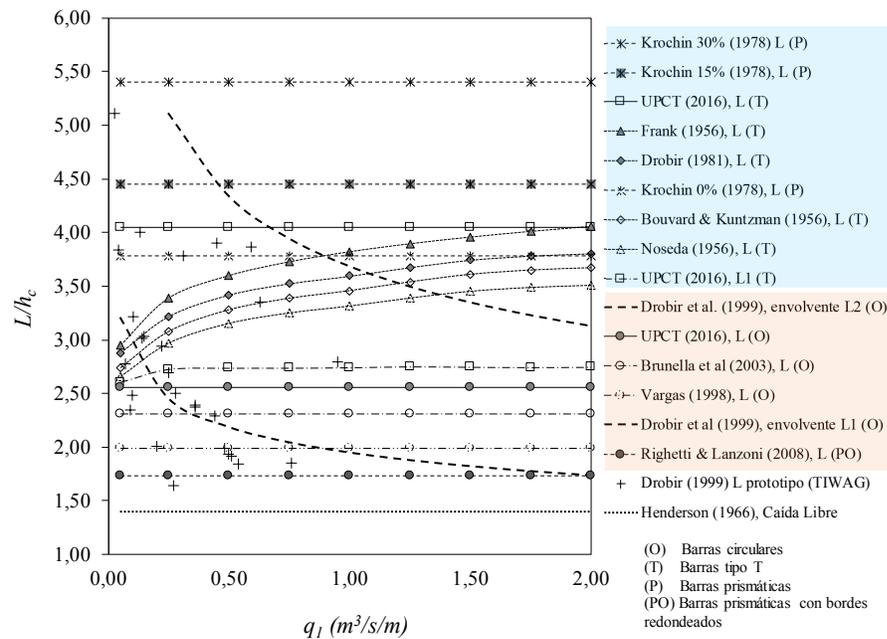


Figura 2 | Relación longitud de reja y calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.60$ y pendiente del 20%.

Como se puede observar en las figuras, existen importantes diferencias en la longitud de reja obtenida con cada una de las formulaciones. Esto se debe a que cada trabajo experimental se ha realizado con diferentes parámetros en lo que se refiere a índices de huecos, forma de las barras, pendiente de la reja y condiciones de aproximación del flujo.

En el presente trabajo se han estudiado 237 casos, variando los caudales entrantes al modelo, q_1 , se ha medido el calado al inicio de la reja, h_0 , así como la longitud de captación, L , las pendientes longitudinales adoptadas por la reja (0, 10, 20, 30 y 33%), así como el índice de huecos de la reja ($m = 0.28$ y 0.60). A partir de los valores de longitud de captación medida en laboratorio con ayuda de imágenes tomadas mediante cámara fotográfica réflex se analizan las principales variables

adimensionales en este tipo de flujo y se propone una regresión lineal múltiple. Este trabajo complementa trabajos experimentales anteriores llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la UPCT utilizando barras planas de sección en T.

MATERIALES Y MÉTODOS

Campaña experimental

El Laboratorio de Hidráulica de la UPCT cuenta con un sistema de captación de fondo que se construyó en 2011 basado en las experiencias de Nosedá (1956a). La estructura consta de un canal de aproximación de sección rectangular de 5.00 m de longitud y 0.50 m de ancho al final del cual se ubica diversos tipos de rejas de fondo. En el presente estudio se han utilizado rejas formadas por barras de sección circular, de 0.90 m de longitud, y diámetro $b_w = 0.030$ m, y con índices de huecos $m = 0.28$, y $m = 0.60$ (correspondientes a separación entre barras $b_l = 0.012$ m y 0.045 m, respectivamente). Las rejas basculan permitiendo adoptar diferentes pendientes, $tg\theta$, (desde la horizontal hasta el 33%). La medición del caudal entrante al sistema, q_1 , se realiza mediante un caudalímetro electromagnético de 125 mm Endress Häuser Promag 53 W, con un porcentaje de error en la medición del orden del 0.5% (García, 2016). El calado al inicio, h_0 , se ha medido utilizando un limnómetro vertical con precisión de 0.5 mm (Castillo et al., 2017; Carrillo et al., 2017). La longitud de reja necesaria para captar la totalidad del caudal entrante se ha medido tanto de forma visual como con la ayuda de imágenes tomadas con cámara réflex desde una sección longitudinal al flujo (ver Figuras 3 y 4).

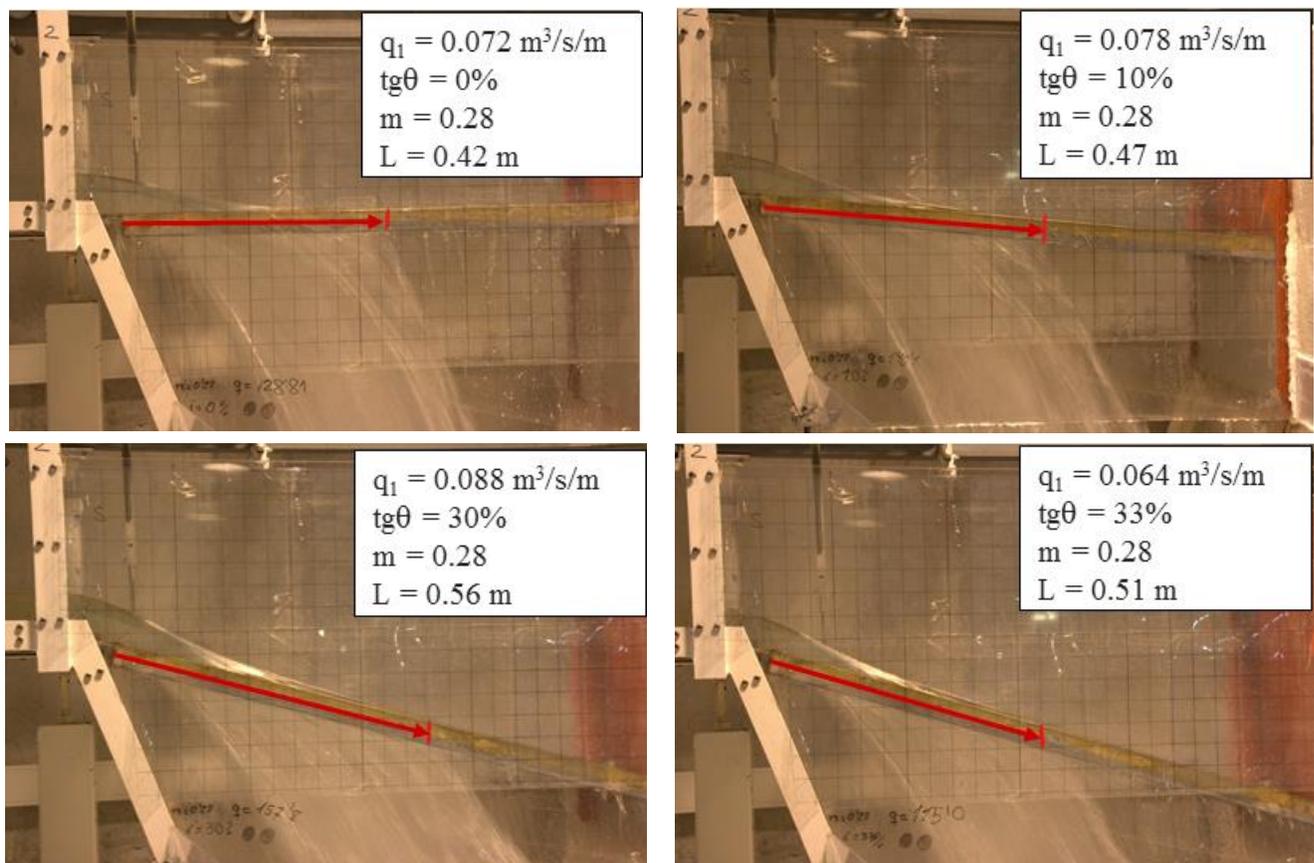


Figura 1 | Comportamiento de la reja para diferentes caudales y pendientes para una reja con $m = 0.28$.

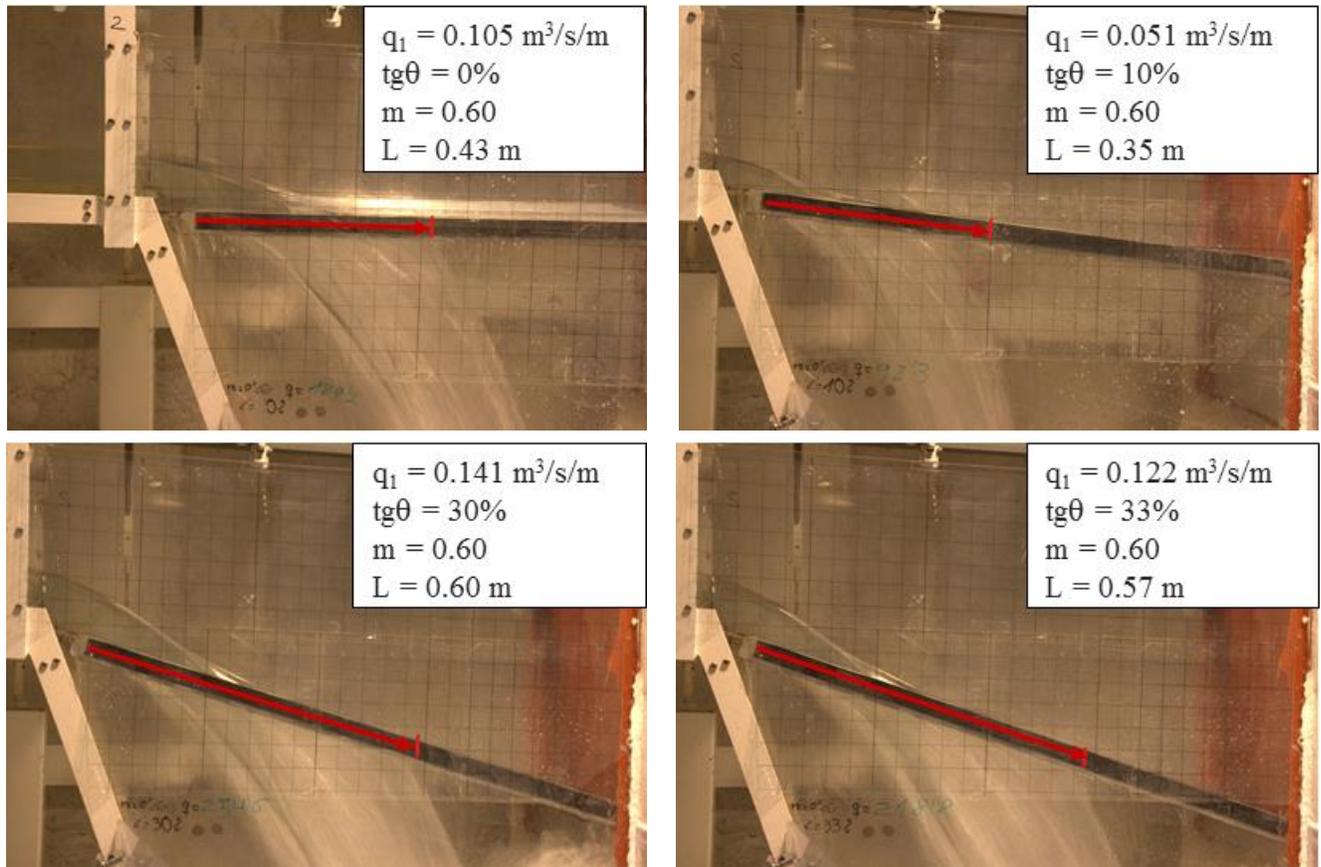


Figura 2 | Comportamiento de la reja para diferentes caudales y pendientes para una reja con $m = 0.60$.

La campaña se compone de un total de 112 puntos medidos para la reja de índice de huecos $m = 0.28$ y 125 puntos para la reja de $m = 0.60$, que se reparten en las cinco pendientes longitudinales analizadas. Para cada índice de huecos, en las Figuras 5 y 6 se muestran los valores de longitud de reja necesaria para captar un determinado caudal, L , frente a cada uno de los caudales entrantes, q_1 , agrupados en función de la pendiente longitudinal de la reja, $\text{tg}\theta$.

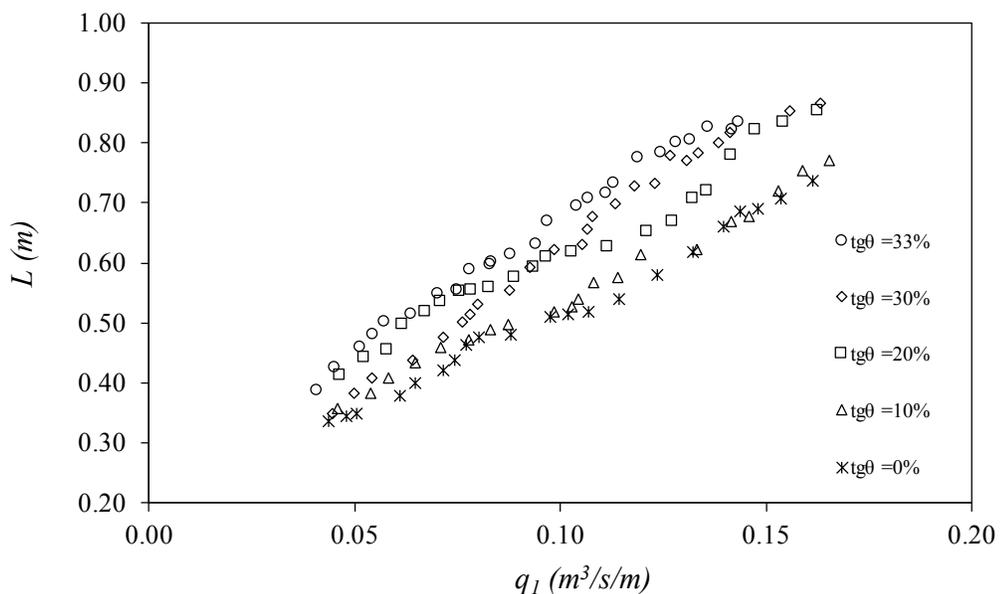


Figura 3 | Longitud de reja en función del caudal específico de captación para $m = 0.28$.

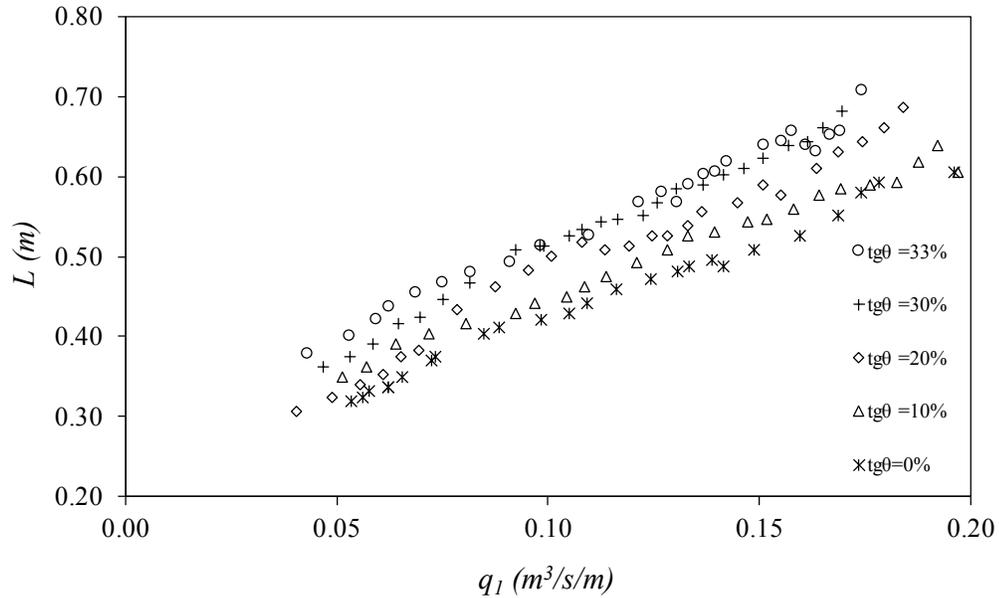


Figura 4 | Longitud de reja en función del caudal específico de captación para $m = 0.60$.

Para los índices de hueco $m = 0.28$ y $m = 0.60$, en las Figuras 7 y 8 se representan los valores de calado medido al inicio de la reja, h_0 , en función del caudal entrante a la reja y para las diversas pendientes longitudinales, $tg\theta$.

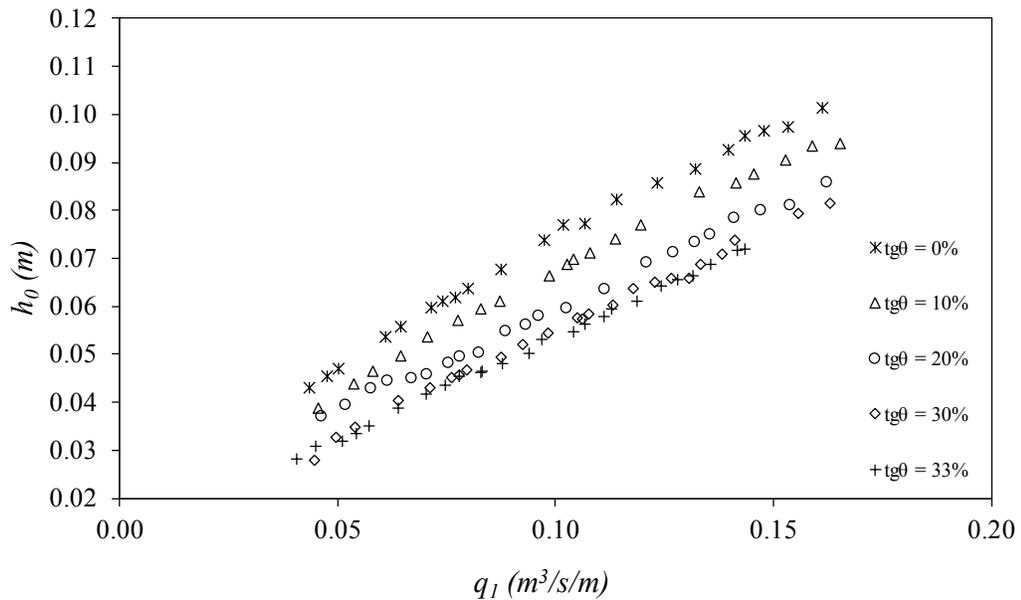


Figura 5 | Calado al inicio de la reja en función del caudal específico de captación para $m = 0.28$.

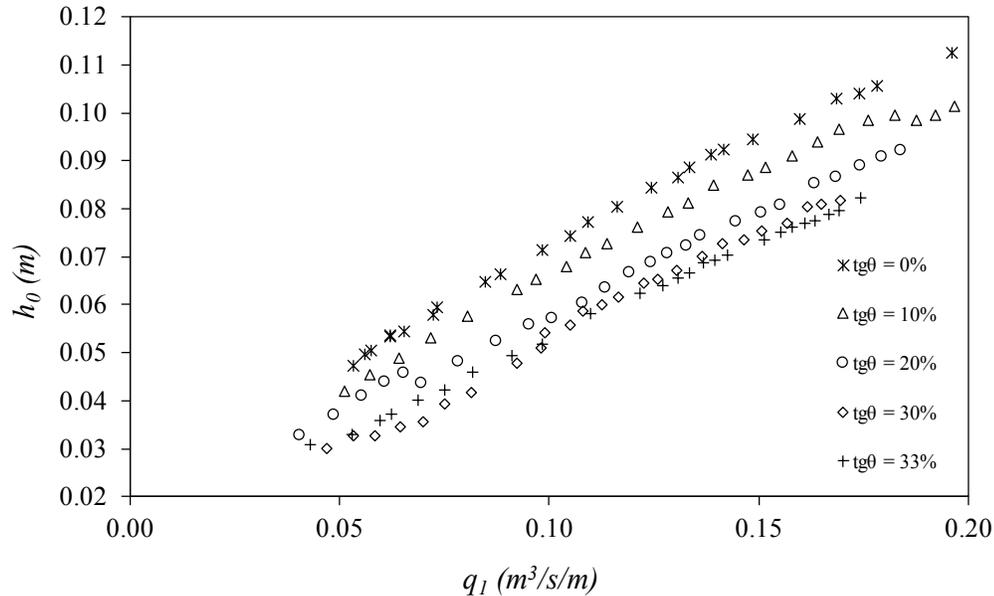


Figura 6 | Calado al inicio de la reja en función del caudal específico de captación para $m = 0.60$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico de los datos

Teniendo en cuenta los trabajos experimentales anteriores realizados en los sistemas de captación de fondo (García, 2016), se parte de que la longitud de reja mojada necesaria para captar un determinado caudal es función de diversas variables obtenidas con análisis dimensional:

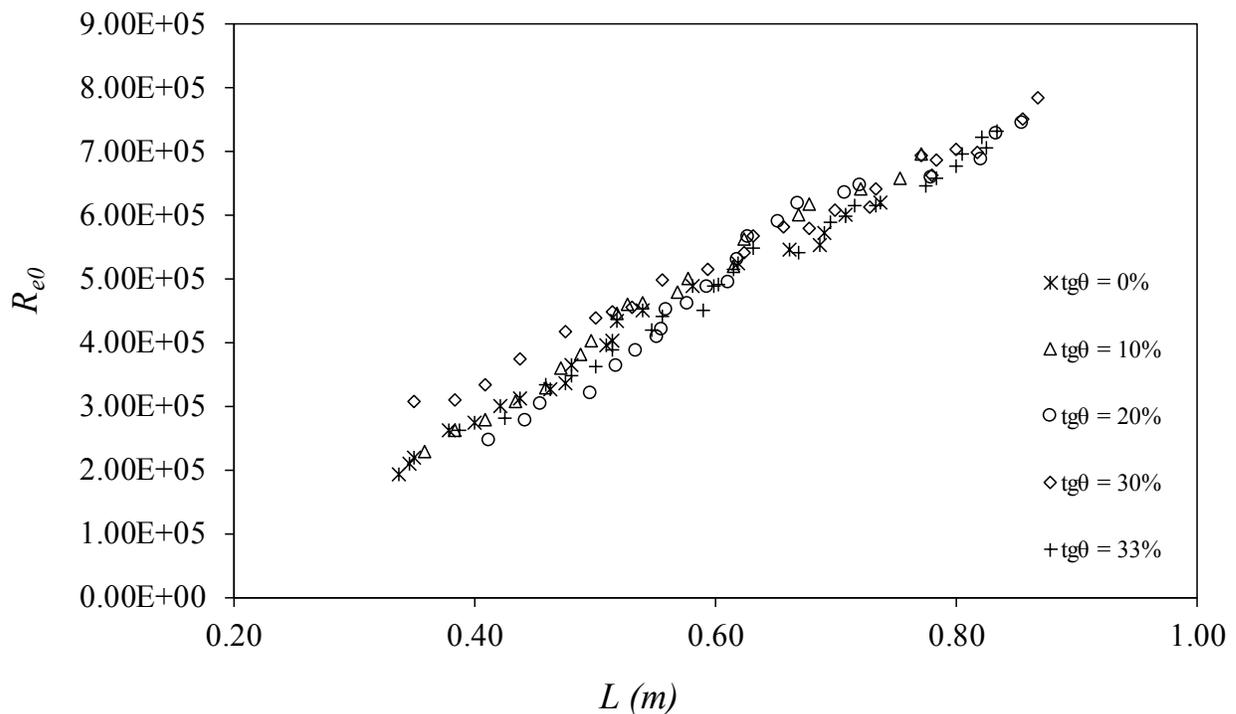
$$L_{reja} = f\left(\frac{H_0}{h_0}, Fr_0, Re_0, We_0, \frac{b_w}{b_l}, C_{qH}, \frac{H_0}{C_{q0}m}, \frac{H_{min}}{C_{q0}m}, tg\theta\right) \quad (1)$$

donde: H_0 es la energía específica al inicio de la reja; h_0 el calado al inicio de la reja; $Fr_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gL}}$ el número de Froude al inicio de la reja; $V_0 = q_1/h_0$ la velocidad al inicio de la reja; $Re_0 = \frac{4R_{hc}V_0}{\mu}$ el número de Reynolds considerado al inicio de la reja, tal como se presenta por Brunella et al. (2003); R_{hc} el radio hidráulico asociado al calado crítico según Brunella et al. (2003); $We_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\sigma/(\rho L)}}$ el número de Weber al inicio de la reja; b_w el ancho de la barra; b_l el espacio entre barras; L_{reja} la longitud de la reja; C_{qH} el coeficiente de descarga de la reja considerando la energía específica del sistema; C_{q0} el coeficiente de descarga estático; H_{min} la energía específica mínima; y m el índice de huecos.

A partir de los valores de longitud de reja medidos en laboratorio para las rejillas de barras circulares de índice de huecos $m = 0.28$ y $m = 0.60$, se realiza el análisis estadístico de los datos con el software IBM® SPSS® Statistics, versión 24. Se presentan a continuación los valores de correlación bivariada de Pearson para cada pareja de variables disponibles y con nivel de significación inferior a 0.005. Los resultados se recogen en la Tabla 1. Se observan algunas correlaciones entre variables que permiten trazar a posteriori una regresión lineal múltiple, como es el caso de la correlación bivariada de Pearson $R = 0.88$ y 0.86 para las variables adimensionales $\frac{H_0}{C_{q0}m}$ y $\frac{H_{min}}{C_{q0}m}$, respectivamente. También el número de Reynolds calculado al inicio de la reja (Brunella et al, 2003), Re_0 , presenta un valor de correlación elevado, $R = 0.86$, como se puede observar en la Figura 9.

Tabla 1 | Matriz de correlaciones de Pearson bivariadas entre variables seleccionadas para rejillas de barras circulares.

	H_o/h_o	F_{ro}	R_{eo}	W_{eo}	b_w/b_l	L_{reja}	C_{qH}	$H_o/(C_{qo}m)$	$H_{min}/(C_{qo}m)$	$tg\theta$
H_o/h_o	1.00	-0.99	-0.05	0.05	0.05	-0.06	0.43	-0.04	0.19	0.89
F_{ro}	-0.99	1.00	0.00	-0.09	-0.05	0.02	-0.43	0.01	-0.22	0.93
R_{eo}	-0.03	0.00	1.00	0.99	-0.17	0.86	-0.11	0.60	0.59	0.31
W_{eo}	-0.11	-0.09	0.99	1.00	-0.17	0.84	-0.08	0.58	0.59	0.19
b_w/b_l	-0.05	-0.05	-0.17	-0.17	1.00	0.28	0.91	0.66	0.65	0.04
L_{reja}	-0.01	0.02	0.86	0.84	0.28	1.00	0.24	0.88	0.86	0.33
C_{qH}	-0.42	-0.43	-0.11	-0.08	0.91	0.24	1.00	0.61	0.69	-0.45
$H_o/(C_{qo}m)$	-0.01	0.01	0.60	0.58	0.66	0.88	0.61	1.00	0.97	0.37
$H_{omin}/(C_{qo}m)$	-0.24	-0.22	0.59	0.59	0.65	0.86	0.69	0.97	1.00	0.00
$tg\theta$	0.90	0.93	0.31	0.19	0.04	0.33	-0.45	0.37	0.00	1.00

**Figura 7** | Variación del Número de Reynolds al inicio de la rejilla y la longitud de la rejilla para $m = 0.28$.

En la Figura 10 se observa que para barras circulares el número de Froude al inicio de la rejilla, F_{ro} , no presenta una correlación con la longitud de rejilla mojada. Sin embargo, muchos de los ajustes de la longitud de rejilla existentes en la bibliografía utilizan dicho número adimensional entre sus variables. Se observa además una cierta diferencia de longitud para valores de caudal similares al variar la pendiente longitudinal de la rejilla, corroborando lo observado en las rejillas formadas por barras con sección plana en T (García, 2016). Esto se debe a que la longitud de rejilla mojada en su tramo final presenta la influencia de la tensión superficial que se ejerce sobre el flujo al recorrer la superficie de las barras en las zonas donde el calado es ya prácticamente insignificante.

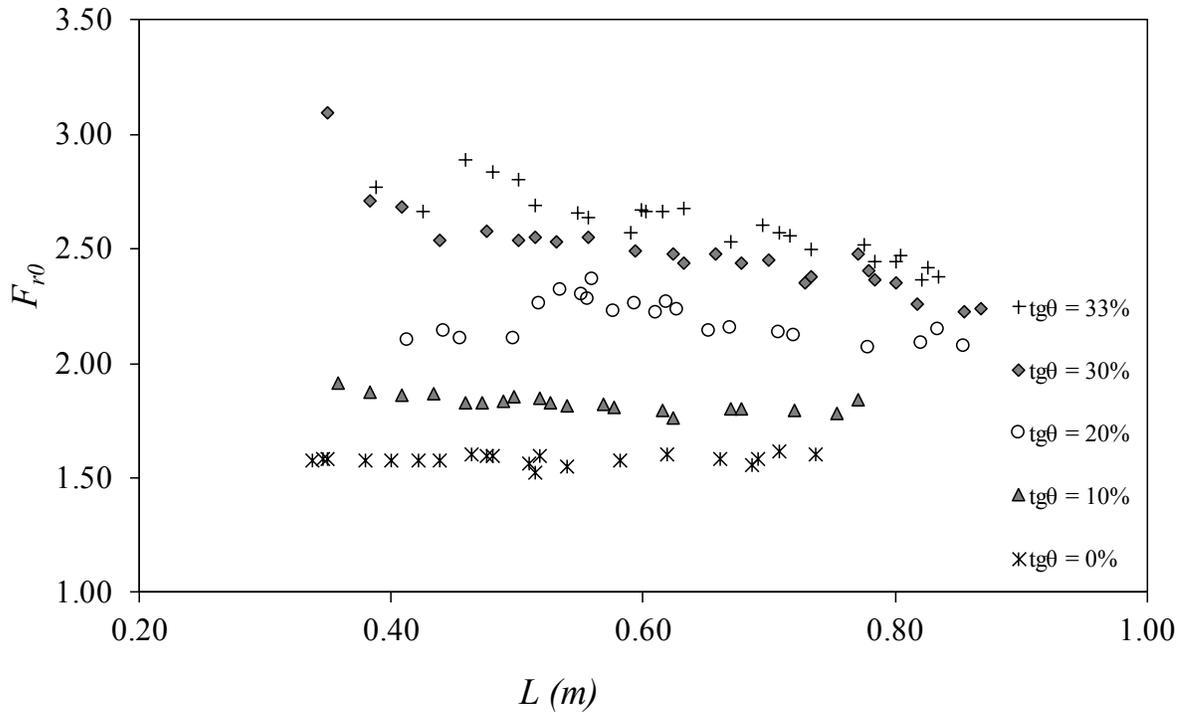


Figura 8 | Variación del Número de Froude al inicio de la reja y la longitud de la reja para $m = 0.28$.

Regresiones lineales múltiples

A continuación, y a la vista de los resultados presentados en el apartado anterior se han elegido diversas variables para poder ajustar los valores de longitud de reja mojada necesaria y captar completamente un determinado caudal.

$$L_{reja_regresión_1} = 1.201 \frac{H_{min}}{C_{q0}m} - 0.054 \frac{b_w}{b_1} + 0.361tg\theta + 0.110 \tag{2}$$

$$L_{reja_regresión_2} = 1.002 \frac{H_0}{C_{q0}m} - 0.063 \frac{b_w}{b_1} - 0.118tg\theta + 0.163 \tag{3}$$

$$L_{reja_regresión_3} = 6.947 \cdot 10^{-7} R_{e0} + 0.073 \frac{b_w}{b_1} + 0.031tg\theta + 0.063 \tag{4}$$

Estos ajustes obtienen coeficientes de correlación $R^2 = 0.98, 0.98$ y 0.96 , respectivamente. En las Figuras 11, 12 y 13 se presentan los valores obtenidos mediante cada una de las regresiones lineales, frente a los valores medidos en laboratorio para diversos caudales, pendientes longitudinales e índice de huecos. De manera general, se observa un buen ajuste en los tres modelos propuestos. Considerando que el valor de calado al inicio de la reja, h_0 , suele ser un valor de difícil estimación, se recomienda utilizar el modelo de regresión 1.

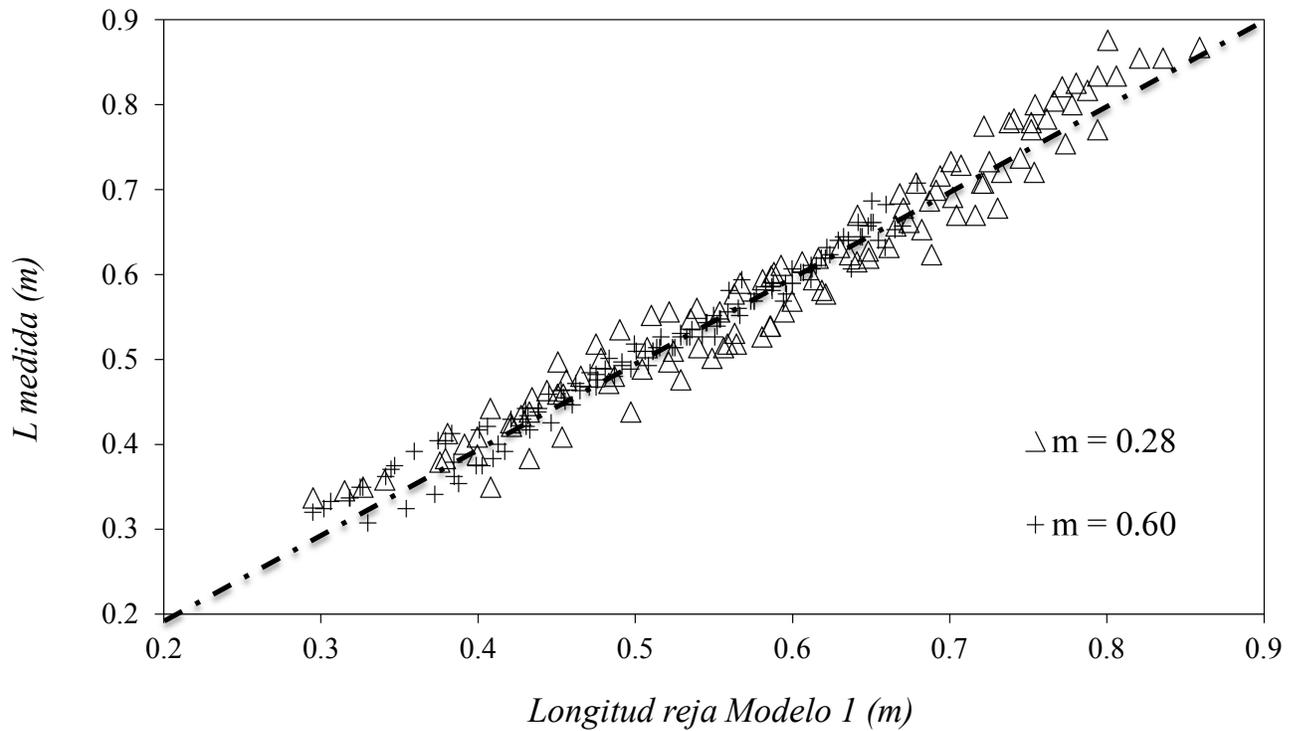


Figura 9 | Longitud de reja medida en laboratorio frente a los valores calculados mediante la regresión lineal múltiple del Modelo 1.

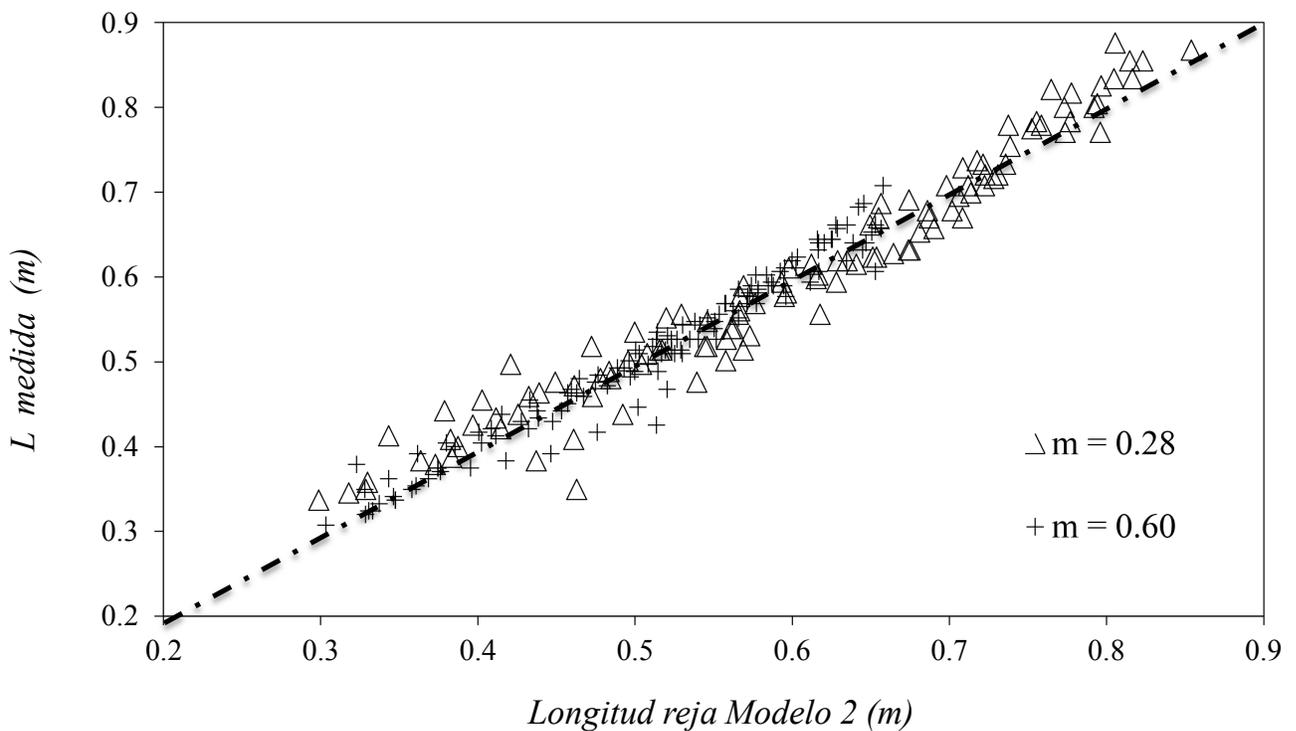


Figura 10 | Longitud de reja medida en laboratorio frente a los valores calculados mediante la regresión lineal múltiple del Modelo 2.

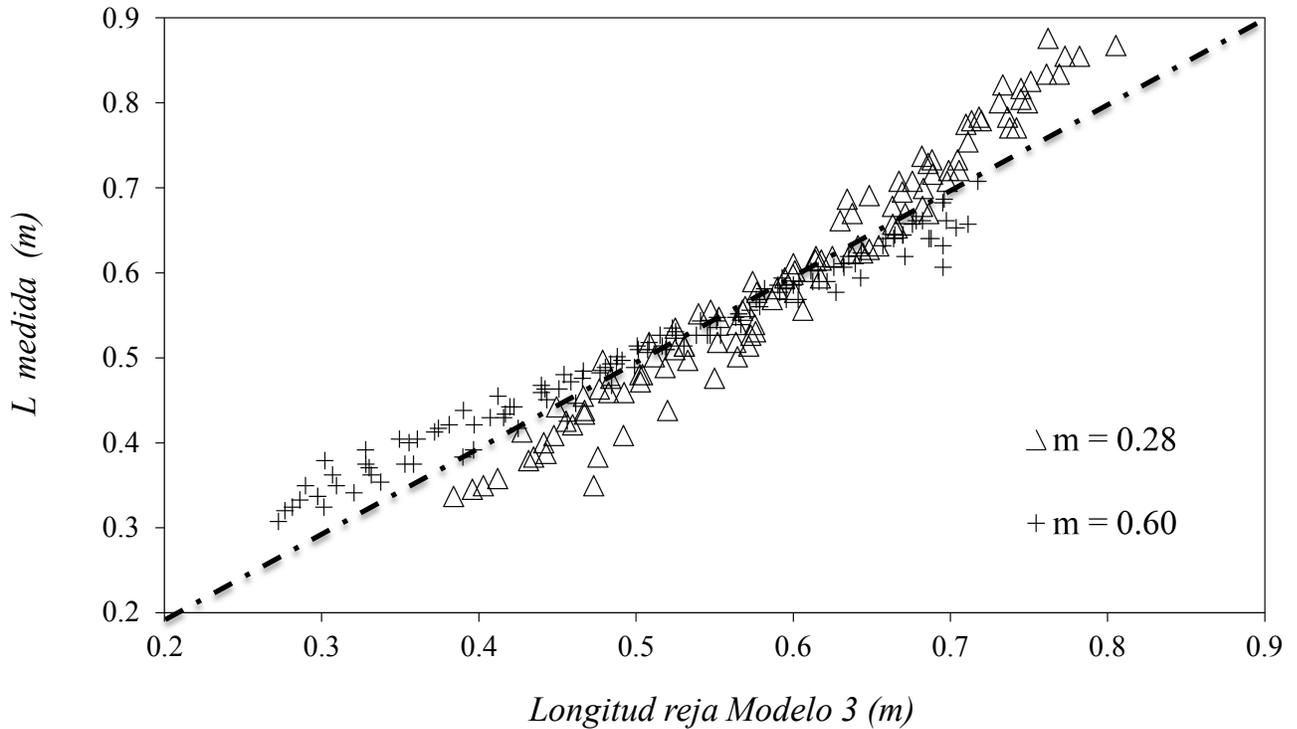


Figura 11 | Longitud de reja medida en laboratorio frente a los valores calculados mediante la regresión lineal múltiple del modelo 3.

Análisis de sensibilidad de las variables seleccionadas

En este apartado se analiza cómo de sensible es la regresión lineal múltiple del Modelo 1, ecuación (2), frente a la variación de una de las variables que intervienen en dicha regresión. Para ello se ha utilizado un índice de sensibilidad, *IS*, que tiene la siguiente forma:

$$IS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{L_{regresión\ X_i} - L_{medida}}{L_{medida}} \right)}{\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}}} \quad (5)$$

donde X_i es el valor adoptado por la variable sobre la que se estudia la sensibilidad (se han utilizado los valores máximos y mínimos de las variables medidas); \bar{X} la media de los valores adoptados por la variable en cuestión; N el número de valores para los que se calcula el índice (237 valores de longitud de reja medidos en el laboratorio); $L_{regresión\ X_i}$ el valor de longitud de reja calculado mediante la regresión propuesta una vez se fija el valor de X_i , y L_{medida} la longitud de reja medida en laboratorio.

Dicho índice de sensibilidad se ha calculado para cada una de las variables que conforman la regresión. En las siguientes tablas se presentan los valores mínimos, máximos y medios de cada variable, así como los resultados mínimos y máximos del índice de sensibilidad *IS*.

Tabla 2 | Valores mínimos, máximos y medios adoptados por las variables utilizadas en la regresión del Modelo 1.

	b_w/b_l	$H_{min}/(C_{q0}m)$	$tg\theta$
X_{Min}	2.58	0.65	0
X_{Max}	0.67	0.15	0.33
X_{Medio}	1.57	0.38	0.19

Tabla 3 | Índice de sensibilidad, IS , obtenido para los valores mínimo y máximo de las variables de la regresión del Modelo 1.

	b_w/b_l	$H_{min}/(C_{q0}m)$	$tg\theta$
IS_{Min}	0.19	-1.16	-0.1
IS_{Max}	-0.13	0.62	0.17

Los valores de la Tabla 3 muestran que, el Modelo 1 presenta una sensibilidad elevada respecto a la variable $\frac{H_{min}}{C_{q0}m}$, lo que implica la necesidad de determinar de forma precisa dicho término, lo cual no requiere de medidas de laboratorio dando al ajuste propuesto una importante robustez.

Formulaciones de Longitud de Reja

En las Figuras 14 y 15 se muestran las formulaciones para obtener la longitud de reja necesaria en función del caudal a captar, incluyendo ahora los valores calculados a partir de la regresión denominada Modelo 1, ecuación (2). Dichas longitudes se recogen para el caso de los índices de huecos $m = 0.28$ y $m = 0.60$, y pendiente longitudinal del 20%. En ambos casos observamos como las longitudes calculadas a partir de la presente regresión quedan por encima de los valores propuestos por Brunella et al. (2003). Esto es debido a que las mediciones presentes incluyen el alcance total del chorro a lo largo de la reja. Además, observando la Figura 15, con $m = 0.60$ los valores de la regresión propuesta se ajustan a los datos medidos por Drobir (1999), valor de L_2 o envolvente a partir de mediciones en prototipo.

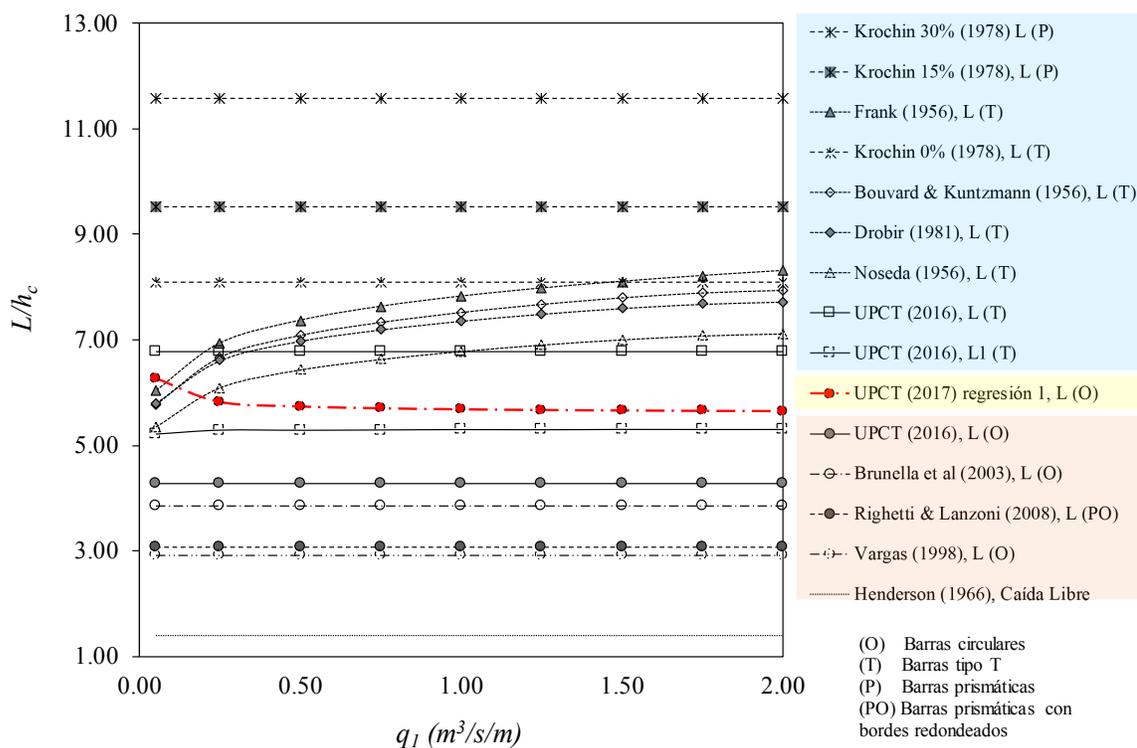


Figura 12 | Relación longitud de reja y calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.28$ y pendiente del 20%.

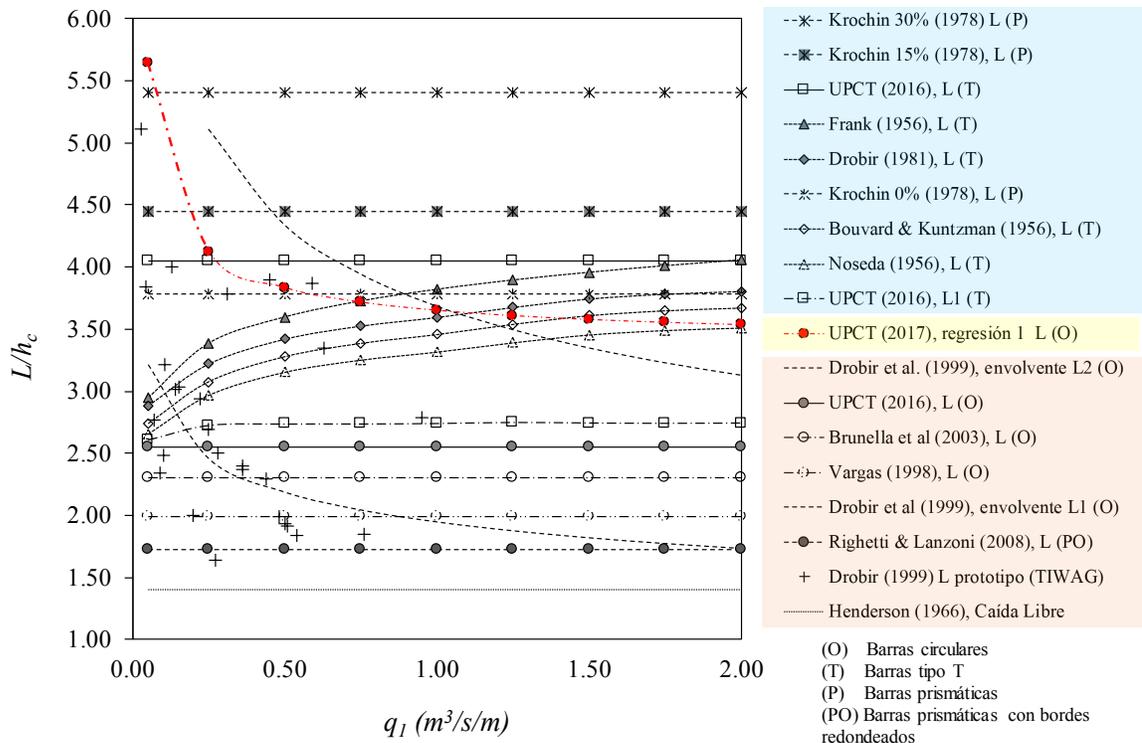


Figura 13 | Relación longitud de reja y calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.60$ y pendiente del 20%.

CONCLUSIONES

La longitud de reja necesaria para el dimensionamiento de los sistemas de captación de fondo es uno de los parámetros principales en el diseño de este tipo de sistemas de captación (Castillo y Lima, 2010; García, 2016). El presente trabajo recoge los resultados de una campaña experimental en laboratorio, a partir de un sistema de captación de fondo con rejillas de barras circulares y dispuestas de forma longitudinal a la corriente, donde se ha analizado la influencia en dicha longitud de parámetros como los números de Froude y de Reynolds, al inicio de la reja. Se ha observado cómo el parámetro longitud presenta una mayor correlación con el número de Reynolds que respecto al número de Froude, lo cual se asocia a una mayor influencia de las fuerzas inerciales y viscosas frente a las gravitacionales una vez que el flujo abandona el canal y atraviesa los huecos entre las barras. También se observa una elevada correlación entre la longitud de reja y el factor adimensional $\frac{H_{min}}{C_{q0}m}$ que no necesita de mediciones de laboratorio para su definición, más allá de conocer el coeficiente de descarga estático de cada tipo de reja y barra (García, 2016). La pendiente longitudinal de la reja es un factor que también hace variar la longitud de reja necesaria. A partir de estos factores se estudian diversas regresiones y se ajustan introduciendo un mínimo número de factores de fácil definición. Se analiza también la sensibilidad de dichos factores dentro de la regresión lineal múltiple propuesta. Para finalizar, se calcula la longitud de reja propuesta y se compara con los valores propuestos por otros investigadores. Se observa cómo la regresión propuesta se ajusta a los valores propuestos por Drobir (1999) a partir de una campaña experimental en prototipo como envolvente de longitud o L_2 .

Trabajos experimentales como el presentado son necesarios para la definición de parámetros de diseño en el estudio de estructuras hidráulicas en las que se producen fenómenos hidráulicos complejos como este caso. Se trata de un Flujo Espacialmente Variado con Caudales Decrecientes, en el que la distribución de presiones y velocidades no es uniforme y donde hay una importante interacción entre el flujo y las barras fijas, lo cual favorece el desarrollo de fenómenos turbulentos intensos.

APÉNDICE

Tabla A1 | Resumen de las expresiones propuestas en la literatura para el cálculo de la longitud mojada de la reja (Gracia, 2016; Haro et al., 2017).

Referencia	Datos Experimentales	Longitud de reja mojada, L (m)		
Noseda, (1956a, 1956b)	$q_{1max} = 100$ l/s; $B = 0.5$ m; $0.16 < m < 0.28$; Barras tipo T; Pendiente: 0- 20%	$L = 1.1848 \frac{H_o}{C_{qh}m}$;	$C_{qh} = \overline{C_{qh}(h)}$;	$C_{qh}(h) = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13}$
Kuntzmann & Bouvard, (1954)	Información de Noseda (1956)	$L = \left\{ \frac{1}{2m'} \left[\left(j + \frac{1}{2j^2} \right) \arcsen \sqrt{\frac{j}{j + \frac{1}{2j^2}}} + 3 \sqrt{\frac{1}{2j}} \right] + \left(\frac{0,303}{m'^2} + \frac{2j^3 - 3j^2 + 1}{4j^2} \right) tg\theta \right\} h_1 \cos\theta$ $j = \frac{h_1}{h_c} = 1$; $m' = C_{qo}m$; $C_{qo} = 0,82$		
Frank (1956)	Información de Noseda (1956)	$L = 2.561 \frac{q_1}{\lambda \sqrt{h_o}}$;	$\lambda = mC_{qh} \sqrt{2g \cos\theta}$;	$C_{qh} = \overline{C_{qh}(h)}_{Noseda}$
Henderson (1966)	-	Caida Libre: $L = 1.4h_c$		
Krochin (1978)	Información de Melik Nubarov (Danelia N.F., 1964) con barras prismáticas y planas	$L = \left[\frac{0.313q}{(C_{qH}k_1)^{3/2}} \right]^{2/3}$; $k_1 = (1 - f)m$; $C_{qH} = C_0 - 0.325 \tan\theta$; $C_0 = 0.50$		
Drobir (1981)	Información de Frank (1959), Bouvard y Kuntzmann (1956)	$L = \frac{0.846}{C_{qh}m^{1/2}(\theta)\sqrt{x}} \sqrt[3]{q_1^2}$; $2\cos\theta x^3 - 3x^2 + 1 = 0$; $C_{qh} = \overline{C_{qh}(h)}_{Noseda}$		
Drobir et al. (1999)	$q_{1max} = 20$ l/s; $B = 0.5$ m; $m = 0.6$ Barras circulares; Pendiente: 0 - 20%	$L_1 = 0.9088q_1^{0.4993}$;	$L_2 = 1.7205q_1^{0.4296}$;	L_{TIWAG}
Brunella et al. (2003)	$q_{1max} = 100$ l/s; $B = 50$ cm; Barras circulares Dos tipos de ensayos: $m = 0.352$ y $m = 0.664$ Pendiente: 0° - 51°	$L = \frac{0.83H_o}{C_{qo}m}$; $C_{qo} = 0.87$		
Righetti y Lanzoni (2008)	$q_{1max} = 37.5$ l/s; $B = 25$ cm Barras prismáticas con bordes redondeados; $m = 0.2$; $b_l = 0.5$ cm; $b_w = 2.0$ cm	$\Delta Q = C_{qo}mBL\sqrt{2gH_o} \left(\frac{a}{2} \frac{L}{H_o} F_{H0} + 1 \right) \{ \tanh[b_o(\sqrt{2} - F_{H0})] \}^{b_a}$ $F_{H0} = \frac{U_o}{\sqrt{gH_o}}$; $a = -0.1056$; $b_o = 1.5$; $b_a = 0.478$		
Vargas (1998)	$q_{1max} = 40$ l/s; $B = 55.2$ cm; Barras circulares Pendiente: 0 - 20°; Dos tipos de ensayos: $m = 0.33$ y $m = 0.5$	$L = k_2 \sqrt{\frac{2 \cos\theta q_1^2}{mgh_1}}$; $k_2 = 1.1$		
UPCT García (2016)	$q_{1max} = 77.7$ l/s; $0.16 < m < 0.28$; $0.0057 < b_l < 0.0117$; Barras tipo T; Pendiente: 0- 33%	L	$L \approx 1.3 \frac{h_c}{C_{qo}m} (1 + 0.3tg\theta)$;	$C_{qo} = a \cdot e^{-0.77m}$
			$a = 1.43$ (barras circulares);	$a = 0.90$ (barras tipo T)
		L ₁	$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_o + xsen\theta)(H_o + xsen\theta - h\cos\theta)} + hsen\theta}{3h\cos\theta - 2(H_o + xsen\theta)}$;	$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75(\frac{x}{h_c}m)}}{(1 + 0.9tg\theta)}$

Nota: Se considera que al inicio de la reja el calado h_1 es igual al calado crítico h_c ; el calado al final de la reja h_2 es igual a cero; la energía específica al inicio de la reja $H_o = H_{min}$; B es el ancho del canal; q_1 o q es el caudal específico de captación, θ es el ángulo de inclinación de la rejilla; b_l es el espacio entre barras y b_w es el ancho de la barra; l es el valor del intereje ($b_l + b_w$); F_{H0} es el número de Froude al inicio de la reja; C_q es el coeficiente de descarga de la reja (estático o variable), m es la relación entre vacíos y a , b_o , b_a , k_2 son coeficientes propios de las ecuaciones en que intervienen; así como f es el factor de obstrucción (%).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero 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

- Brunella, S., Hager, W.H., Minor, H.E. 2003. Hydraulics of Bottom Rack Intake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 2–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:1(2)).
- Carrillo, J.M., Castillo, L.G., García, J.T. 2017. Considerations for the design of bottom intake systems. *Journal of Hydroinformatics* (in press).
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., García, J.T. 2013. Comparison of clear water flow and sediment flow through bottom racks using some lab measurements and CFD methodology. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 172, 22–24. <https://doi.org/10.2495/RBM130191>.
- Castillo, L.G., García, J.T., Carrillo, J.M. 2014. Experimental measurements of flow and sediment transport through bottom racks-influence of gravels sizes on the rack. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*, 2165-2172. <https://doi.org/10.1201/b17133-290>.
- Castillo, L.G., García, J.T., Carrillo, J.M. 2016. Experimental and Numerical Study of Bottom Rack Occlusion by Flow with Gravel-Sized Sediment. Application to Ephemeral Streams in Semi-Arid Regions. *Water* 8, 166. <https://doi.org/10.3390/w8040166>.
- Castillo, L.G., García, J.T., & Carrillo, J.M. 2017. Influence of Rack Slope and Approaching Conditions in Bottom Intake Systems. *Water* 2017, 9, 65. <https://doi.org/10.3390/W9010065>.
- Castillo, L.G., 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.
- García, J.T. 2016. *Estudio experimental y numérico de los sistemas de captación de fondo*. Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Haro, P., García, J.T., Castillo, L.G. 2017. Longitud de reja de un sistema de captación de fondo. *Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores y Profesionales*, 1, 9–11.
- Krochin, S. 1978. *Diseño Hidráulico*. E. Universitaria, Ed. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Kuntzmann, J., Bouvard, M. 1954. Étude Théorique des Grilles de Prises D’Eau du Type « En-Dessous ». *La Houille Blanche* (5), 569–574. <https://doi.org/10.1051/lhb/1954049>.
- Noseda, G. 1956a. Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. *L’ Energia Elettrica*, 41–51.
- Noseda, G. 1956b. Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. *Ricerca Sperimentale. L’ Energia Elettrica*, 565–581.