

**PERFILES DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE REJILLAS EN BOCATOMAS  
DE FONDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE MOSTKOW**



**WATER SURFACE PROFILES AND DESIGN OF WATER BOTTOM RACK INTAKES**

<sup>1</sup> Juan Felipe Ochoa

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, M.Sc.(c) en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Docente Catedrático Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, GRIDIC. Correo: [jfochoa@elpoli.edu.co](mailto:jfochoa@elpoli.edu.co)

# PERFILES DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE REJILLAS EN BOCATOMAS DE FONDO UTILIZANDO EL MÉTODO DE MOSTKOW

## WATER SURFACE PROFILES AND DESIGN OF WATER BOTTOM RACK INTAKES

Juan Felipe Ochoa

### RESUMEN

Las bocatomas de fondo o vertederos tiroleses son obras hidráulicas utilizadas ampliamente en nuestro país dado su buen funcionamiento en cauces de montaña. En estas estructuras, la ocurrencia de flujo espacialmente variado sobre la rejilla de captación no permite una solución analítica directa de la variación de la superficie libre del agua sobre la rejilla, lo cual ha generado que su dimensionamiento emplee en general criterios empíricos y constructivos. Para realizar un diseño más preciso que cuente con la variabilidad del caudal sobre la estructura que facilite el dimensionamiento de las rejillas aprovechando de forma adecuada el recurso hídrico, se presenta el método de Mostkow para calcular el perfil de flujo sobre las rejillas junto con relaciones gráficas que de manera sencilla permiten determinar la longitud mínima de rejillas de barras paralelas y rejillas perforadas en términos del caudal captado, la inclinación y el porcentaje de obturación de la rejillas.

**Palabras clave:** Captaciones Superficiales, Flujo en canales abiertos, Método de Mostkow.

*Recibido: 16 de febrero de 2011*

*Aceptado: 29 de abril de 2011*

### ABSTRACT

Water bottom rack intakes or tyrolean weirs are hydraulic structures widely used in our country given its good performance in mountain streams. In this structures the occurrence of spatially(gradually) varied flow over the intake does not allow an analytic solution to the variation of the water surface over the intake which has lead to its general sizing criteria uses empirical and constructive reasons. To make a more accurate design accounting with the flow variability over the structure, that facilitates the rack dimensioning of the intakes properly exploiting the water resource, Mostkow's method is presented to calculate the water surface profile along with the graphs which in a simple manner allow to determine the minimum length of rack intakes in terms of the discharge, the slope and the clogging percentage of the racks.

**Keywords:** Water intakes Intakes, Open channel flow, Mostkow's method

*Received: April 29, 2011*

*Accepted: April 29, 2011*

# 1. INTRODUCCIÓN

Las bocatomas de fondo son estructuras dispuestas en algunos problemas de drenaje superficial sobre ríos y quebradas con el objeto de captar el agua para acueductos y pequeñas centrales hidroeléctricas. Su diseño hidráulico derivado de los diseños de vertederos tiroleses (Figura 1) ha sido adaptado a nuestro medio por su buen funcionamiento en cauces de montaña y consiste fundamentalmente en determinar las dimensiones de la obra de contención, los vertederos de descarga y la rejilla que determina las condiciones y eficiencia del caudal captado.

Estas estructuras no sólo se utilizan con propósitos de captación de agua, sino que también han sido utilizadas en la construcción de rompedores de flujo de detritos (debris flow) [1] y como parte de las obras disipadoras de energía en canales prismáticos con pendiente creciente [2] y [3].

En todos los casos, la rejilla de captación se diseña para absorber la mayor cantidad de agua sobre la longitud mínima, ubicándose en posición horizontal o con inclinación de hasta 20 % según el flujo (para aumentar la eficiencia de la captación y desfavorecer el taponamiento de la reja por la acumulación de sólidos), sobre una galería construida en el cuerpo de un vertedero a través del cauce y son obras que deben operar bajo el régimen de caudal de las corrientes superficiales e incluso en condiciones extremas puesto que la carga de sedimentos de lecho durante una creciente pasará sobre la estructura [4].

La rejilla de captación en general está compuesta por barras metálicas alineadas en dirección del flujo con separaciones no mayores a 5 cm o por una lámina perforada con agujeros, con una longitud estructural no mayor de 1.25 m. Para reducir tanto como sea posible los taponamientos de la rejilla, se disponen en general barras longitudinales, cuyo espaciado entre sí se selecciona en función de las características granulométricas de los sedimentos que circulan con el flujo y del uso del caudal captado. Las metodologías de diseño de captaciones superficiales, recomiendan utilizar un factor de mayoración entre 1.5-2.0 del caudal a captar, tal que, el área mínima necesaria para derivar el caudal permita que el agua pase a través de la rejilla aun cuando la rejilla se encuentre parcialmente obstruida por la interferencia de los sedimentos.

Debido entonces a la importancia de determinar adecuadamente el área de la rejilla que captará un caudal dado, con la mínima longitud posible, el problema ha sido investigado continuamente tanto teórica como

experimentalmente [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y [13].

El análisis teórico supone que el flujo sobre la rejilla es unidimensional, variando gradualmente y que la distribución hidrostática de presiones se mantiene sobre cada sección, aun cuando, en la práctica se observa cómo la superficie libre del flujo se abate, alejándose de la distribución hidrostática de presiones.

Suponiendo que la carga de energía del flujo es constante a lo largo de la rejilla, el análisis matemático genera una ecuación diferencial de sexto grado de primer orden, que permite evaluar el caudal en cualquier sección; sin embargo, la imposibilidad de resolver analíticamente esta ecuación más allá de ciertas condiciones de flujo establecidas, ha demandado que el análisis de la condición de flujo se explore mediante modelos físicos y simplificaciones conceptuales.

Para el dimensionamiento de la rejilla, se dispone de diferentes metodologías que recientemente se han compilado [14], e incluso trabajos recientes [3] y [13] proponen otras expresiones de cálculo, donde en la instrumentación se han utilizado medidores Doppler de velocidad, que permiten conocer con mayor precisión la distribución de presiones y de velocidades en el flujo a lo largo de la rejilla.

Sin embargo, en la práctica académica y profesional se observa que éstas metodologías de diseño no se encuentran lo suficientemente difundidas y que en general el dimensionamiento de la rejilla se realiza sin incluir en el análisis matemático la variación del caudal captado a través de la rejilla ni la variación de la superficie libre sobre la rejilla, dejando al margen aspectos muy importantes del fenómeno físico.

Con el objeto de dar a conocer la aplicabilidad de las metodologías de dimensionamiento de la rejilla a las cuales se ha hecho mención, este trabajo resume el análisis matemático del flujo espacialmente variado con caudal decreciente que tiene lugar a lo largo de una rejilla de captación, ilustra además la metodología de cálculo de un perfil de flujo sobre una rejilla y presenta una serie de figuras que permiten determinar con facilidad la longitud mínima de la rejilla de captación bajo diferentes configuraciones aplicando el método de Mostkow [8], el cual se ha seleccionado tras comparar los resultados obtenidos en su uso en comparación con otros métodos [14], y por su aplicación en la bibliografía de referencia sobre el tema [15], [16], [17], [18], [19] y [20].

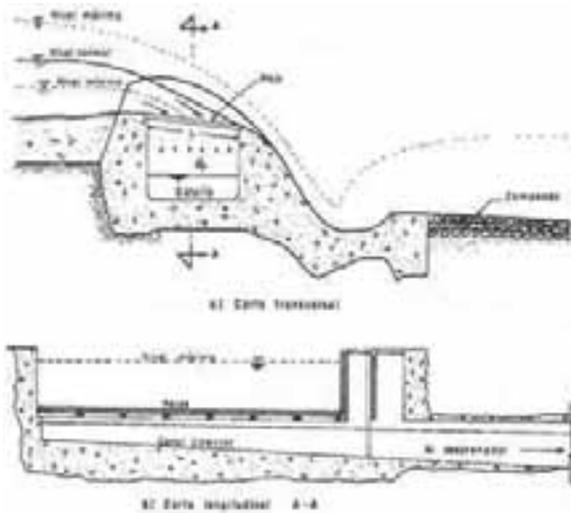


Figura 1. Vertedero tiroles. Tomado de Sotelo(2002)

## 2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO SOBRE REJILLAS DE CAPTACIÓN

El flujo permanente espacialmente variado se define como un flujo en el cual el caudal varía en la dirección del flujo y se presenta en situaciones que involucran vertederos de canal lateral, canales con fronteras permeables, alcantarillados de aguas lluvias y estructuras de caída en el fondo de canales [16].

En canales con caudal decreciente (como es el caso del flujo sobre captaciones con rejillas de fondo), se considera que no se tiene una pérdida significativa de energía y que por lo tanto la superficie del agua se puede estimar a partir de la aplicación del principio de la energía.

El modelo de flujo espacialmente variado se considera unidimensional, y por lo tanto las características de tirante y velocidad de movimiento corresponden a los valores sobre el eje del canal aun cuando haya asimetría del flujo que entra o sale. Las hipótesis del modelo se pueden resumir como [4], [15], [16], [17] y [18]:

- La pendiente del canal es uniforme y el caudal que entra o sale induce sólo pequeñas curvaturas en el perfil del flujo y líneas de corriente casi paralelas. Hay distribución hidrostática de la presión en cada sección, sin eliminar con ello pendientes supercríticas.
- La distribución de la velocidad se mantiene igual en

cada sección y los coeficientes de corrección de energía cinética y de cantidad de movimiento son constantes.

- La pérdida de fricción en un tramo se incluye mediante el cálculo de la pendiente de fricción resultante en cada sección.
- El efecto de arrastre (atrapamiento) de aire no se incluye en el tratamiento.
- El momentum lineal del caudal que entra se forma sólo de la componente de cantidad de movimiento; la asimetría que pueda tener dicho caudal en la dirección transversal no influye en las características del flujo. Cuando el caudal sale lo hace a sitios más bajos sin restarle energía específica al flujo principal.

Esta última hipótesis, obliga a que el análisis matemático sea distinto entre el modelo de caudal creciente y el de caudal decreciente, pues la observación experimental del flujo de caudal decreciente muestra que la desviación de caudal hacia el exterior no produce cambios importantes en la energía específica del flujo, siendo el principio de energía muy conveniente para su análisis [4] y [18].

De esta forma, el régimen de flujo sobre la rejilla, corresponde a una condición de flujo espacialmente variado con caudal decreciente, determinado por las ecuaciones de continuidad y energía dadas por:

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{d}{dx}(VA) = V \frac{dA}{dx} + A \frac{dV}{dx} = q_* \quad (1)$$

Donde  $Q$  es el caudal en la sección  $x$  del canal,  $A$  es el área de flujo,  $V$  es la velocidad del flujo y  $q_* = dQ/dx$  es la variación del caudal en función de  $x$ , con  $dQ/dx$  es la variación del caudal a lo largo del eje  $x$ , y es negativo.

La energía total del flujo  $H$ , en una sección transversal del canal, medida desde un nivel de referencia cualquiera, es igual a:

$$H = z + y \cdot \cos\theta + \frac{v^2}{2gA^2} \quad (2)$$

Donde  $y$  es el tirante en la sección perpendicular al fondo y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del canal.

Al derivar la ecuación (2) con respecto a  $x$ , con  $Q$  como variable, se obtiene:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} \cos\theta + \frac{v}{2g} \left[ \frac{2Q}{A^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} \frac{dA}{dx} \right] \quad (3)$$

Con:

$$\frac{dH}{dx} = -S_f; \quad \frac{dE}{dx} = -\text{sen}\theta = -S_o \quad (4a)$$

$$\frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dy} \frac{dy}{dx} + \frac{\partial A}{\partial x} = T \frac{dy}{dx} + \frac{\partial A}{\partial x} \quad (4b)$$

Donde:

$S_o$  es la pendiente de la línea de energía.  
 $S_o'$  es la pendiente del canal (considerando que el canal es de pendiente pequeña).  
 $T=dA/dy$ , es el ancho de la superficie libre de la sección.  $F$  el número de Froude.

Al sustituir las ecuaciones (4a) y (4b) en la ecuación (3) se obtiene finalmente que para un canal prismático, donde  $\partial A/\partial x=0$ , en donde además el ángulo  $\theta$  de inclinación del fondo del canal es pequeño, ( $\cos\theta=1$ ), la variación de la superficie libre está dada por:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f + \frac{\alpha Q}{gA^2} \frac{dQ}{dx}}{1 - \alpha F^2} \quad (5)$$

**2.1. FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO EN CANALES DE CAUDAL DECRECIENTE.**

En el análisis a realizar, la carga de presión real sobre el fondo al inicio de la reja, se escribe como:  $p/g\rho = \alpha'y_o$ , donde  $\alpha'$  es un factor de corrección, tal que cuando la presión corresponde a la hidrostática su valor es uno; esto debido a que como se observa en la Figura 2, la curvatura de las líneas de corriente sobre la rejilla es apreciable, lo que significa que la presión sobre el fondo no es hidrostática y es necesario aplicar un factor de corrección.

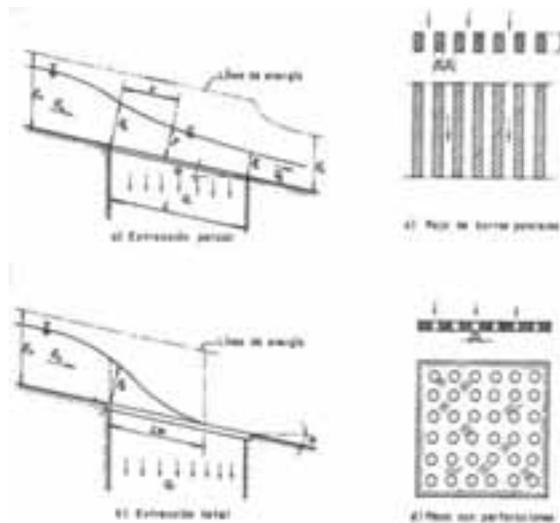


Figura 2. Flujo sobre una reja de fondo. Tomado de Sotelo(2002).

Además, partiendo de que la bocatoma de fondo se localiza en un canal rectangular de ancho  $b$ , con longitud y pendiente pequeñas, donde  $\alpha=1$  y  $S_o \approx S_o'$  con  $A=by$  y  $F^2=Q^2/(gb^2y^3)$ , la ecuación (5) se convierte en:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-Qy \left( \frac{dQ}{dx} \right)}{gb^2y^2 - Q^2} \quad (6)$$

La energía específica  $E_o$  al inicio de la reja, que se considera constante en cualquier sección del canal es igual a:

$$E_o = \alpha'y_o + \frac{V_o^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2} \quad (7)$$

De donde se obtiene que el caudal es:

$$Q = by\sqrt{2g(E_o - y)} \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la (6), se obtiene la siguiente ecuación para determinar el perfil de flujo sobre la rejilla:

$$dx = \frac{\sqrt{g} b (3y - 2E_o)}{\sqrt{2} \sqrt{E_o - y} \left( \frac{dQ}{dx} \right)} dy \quad (9)$$

El caudal  $Q_o$  que conduce el río es igual al de la sección inicial de la reja, y por lo tanto, de la ecuación de energía específica en dicha sección se tiene que:

$$Q_o = by_o\sqrt{2g(E_o - \alpha'y_o)} \quad (10)$$

Para la sección al final de la reja, de la ecuación (8), el caudal  $Q_L$  es igual a:

$$Q_L = by_L\sqrt{2g(E_o - y_L)} \quad (11)$$

Por lo tanto, el caudal captado o retirado  $Q_r$ , por una reja de longitud  $L$  es igual a:

$$Q_r = Q_o - Q_L \quad (12a)$$

O a partir de las expresiones (11) y (12):

$$Q_r = Q_o \left( 1 - \frac{y_L \sqrt{1 - \frac{y_L}{E_o}}}{y_o \sqrt{1 - \frac{y_L}{E_o}}} \right) \quad (12b)$$

Según el trabajo realizado por Mostkow [8], en el caso de rejas construidas con barras paralelas a la corriente, como en la Figura 2c, el flujo a través de las aberturas

es aproximadamente vertical, la pérdida de energía es despreciable y la carga efectiva sobre ellas es prácticamente igual a la energía específica  $E_0$  con que el flujo llega a la reja.

Mientras que en el caso de rejillas formadas a base de una placa perforada (Figura 2d), la dirección del flujo a través de los orificios tiene un ángulo apreciable con la vertical y se ve afectado por los sedimentos incrustados en las perforaciones, que producen una pérdida de energía apreciable por el cambio de dirección, de inclinada eventualmente a vertical. Dicha pérdida es casi igual a la carga de velocidad del flujo sobre la reja, por lo que la carga efectiva es igual a la carga estática o se puede confundir con el tirante.

Expuestas estas razones, se hace necesario presentar por separado las expresiones específicas para determinar la longitud de la rejilla según su tipo.

### 2.1.1 Flujo de barras paralelas al flujo.

En general, la tasa de cambio del caudal unitario derivado a través de la rejilla está dada por una expresión que depende de la carga hidráulica sobre ésta, afectada por un coeficiente de descarga, el cual depende de las características hidráulicas del flujo de aproximación, la geometría de la rejilla (longitud, pendiente y orientación respecto al flujo), y las barras que forman la rejilla (forma, tamaño y espaciamiento).

En el caso de barras paralelas, la carga hidráulica efectiva sobre las aberturas de la reja es la energía específica del flujo sobre ellas y la variación del caudal desviado a través de la reja se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{-dQ}{dx} = \varepsilon C_d b \sqrt{2gE_0} = mb \sqrt{2gE_0} \quad (13)$$

Donde:

$E_0$  = Energía específica del flujo a la entrada de la reja.

$b$  = Ancho total de la rejilla, medido en dirección perpendicular al flujo. (Se está haciendo  $b_{\text{rejilla}} = b_{\text{canal}} = b$ )

$m$  = coeficiente global de descarga ( $m = \varepsilon C_d$ )

$C_d$  = Coeficiente de descarga a través del espacio entre dos barras consecutivas.

$A_n$  = Área neta de paso a través de las barras.

$\varepsilon = (1 - f) \frac{A_n}{A_t}$ , es igual al cociente del área de paso entre rejas y su área total o coeficiente de porosidad afectado por el factor de obturación.

$A_t$  = Área total de rejas.

$f$  = Coeficiente de obstrucción, originado por las arenas y gravas que se incrustan y que se toma de 5 a 30%.

En la reja de barras paralelas se considera que el coeficiente de porosidad  $p$ , es igual a:

$$p = \left( \frac{a}{a+e} \right) \quad (14)$$

Donde  $e$  y  $a$  corresponden a los tamaños del espesor y la abertura entre barras, respectivamente, como se indica en la Figura 2c.

Al sustituir la ecuación (13) en la ecuación (9) y reorganizar, se obtiene que:

$$dx = \frac{\frac{\varepsilon y}{2E_0} - 1}{m \sqrt{1 - \left(\frac{y}{E_0}\right)}} dy \quad (15)$$

Al integrar la ecuación (15), y determinando la constante de integración de la condición de frontera a la entrada de la rejilla donde:  $x=0$ ,  $y=\alpha' y_0$ , la ecuación para el cálculo del perfil de flujo a lo largo de una rejilla de barras paralelas es igual a:

$$x = \frac{1}{m} \left[ y_0 \cdot \sqrt{1 - \alpha' \left(\frac{y}{E_0}\right)} - y \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{E_0}\right)} \right] \quad (16)$$

De la condición de frontera a la salida de la rejilla, donde  $x=L_m$ , se obtiene la ecuación para determinar la longitud mínima necesaria para desviar todo el caudal  $Q_0$  del río a través de la reja al alcanzar el tirante  $y_L=0$  (Ver Figura 2b):

$$L_m = \frac{y_0}{m} \sqrt{1 - \alpha' \left(\frac{y_0}{E_0}\right)} \quad (17)$$

De esta forma, para una reja de longitud  $x=L$  dada y caudal  $Q_0$  mayor en el río, de la ecuación (16) se obtiene el tirante  $y=y_L$  al final de la reja y de la ecuación (12b) se obtiene el caudal realmente captado con la longitud  $L$  de la reja.

Para derivar una expresión que permita determinar la longitud de la rejilla en términos del caudal captado, puede considerarse que en la sección de entrada a la rejilla:  $y=y_0$ , y que de la ecuación (10), con  $Q_0=Q_r$  se tiene que al despejar  $y_0$ , tras sustituir en la ecuación (17), se obtiene que:

$$L_m = \frac{Q_r}{mb \sqrt{2gE_0}} \quad (18)$$

Donde  $Q_r$  es el caudal captado por la reja y  $Q_0$  el de la sección inicial, es decir, el caudal del río.

### 2.1.2 Placa perforada.

En este caso, la carga efectiva sobre la placa perforada está dada por el tirante y la variación del caudal desviado a través de la placa, y se puede expresar como:

$$\frac{-dq}{dx} = sC_d b \sqrt{2gy} = mb \sqrt{2gy} \quad (19)$$

Donde los términos tienen igual interpretación que la dada para la ecuación (13).

Sustituyendo la ecuación (19) en la ecuación (9), tras simplificar se obtiene:

$$dx = \frac{1}{m} \left[ \frac{\frac{3}{2} \sqrt{\left(\frac{y}{E_o}\right)} dy}{\sqrt{1 - \left(\frac{y}{E_o}\right)}} - \frac{dy}{\sqrt{\left(\frac{y}{E_o}\right) - \left(\frac{y}{E_o}\right)^2}} \right] \quad (20)$$

Luego de la integración de la ecuación (20), determinando la constante de integración de la misma forma que en el caso de la rejilla de placas paralelas, se obtiene que:

$$x = \frac{E_o}{m} \left\{ \frac{1}{4} \arcsen \left[ \left( 1 - 2 \frac{y}{E_o} \right) \right] - \arcsen \left( 1 - 2 \frac{\alpha' y}{E_o} \right) \right\} - \frac{1}{m} \left[ \sqrt{\frac{y}{E_o} \left( 1 - \frac{y}{E_o} \right)} - \sqrt{\frac{\alpha' y}{E_o} \left( 1 - \frac{\alpha' y}{E_o} \right)} \right] \quad (21)$$

Nuevamente, para  $y_L=0$ , se obtiene que  $x=L_m$ , tal que la longitud mínima necesaria para la captación del total de caudal, es igual a:

$$L_m = \frac{E_o}{m} \left\{ \frac{3}{2} \left[ \sqrt{\frac{\alpha' y_o}{E_o} \left( 1 - \frac{\alpha' y_o}{E_o} \right)} - \frac{1}{4} \arcsen \left( 1 - 2 \frac{\alpha' y_o}{E_o} \right) \right] + \frac{\pi}{E} \right\} \quad (22)$$

Para el vertedero tirolés Mostkow[8], propone que la relación entre el caudal  $Q_o$  y la energía específica  $E_o$  del flujo que llega a la rejilla, está dada por la ecuación de descarga de un vertedero de cresta ancha:

$$Q_o = C_v b E_o^{1.5} \quad (23)$$

La Tabla 1 muestra también valores de la relación  $E_o/E_L$  de energía específica al principio y final de la rejilla en caso de captación parcial, así como los valores típicos de los demás parámetros que intervienen en el cálculo de los dos tipos de rejillas analizadas.

Tabla 1. Valores experimentales de  $C_v$ ,  $y_o/E_o$ ,  $\alpha'$ ,  $E_o/E_L$  y  $C_d$  para el flujo sobre rejillas, según Mostkow (1959)

| Tipo de rejilla | De barras paralelas         | De placa perforada          |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Inclinación     | Horizontal<br>Pendiente 1:5 | Horizontal<br>Pendiente 1:5 |
| $C_v$           | 1.55<br>1.55                | 1.634<br>1.528              |
| $y_o/E_o$       | 0.509<br>0.449              | 0.594<br>0.496              |
| $\alpha'$       | 0.850<br>0.615              | 0.970<br>0.750              |
| $E_o/E_L$       | 0.640<br>0.609              | 0.815<br>1.130              |
| $C_d$           | 0.497<br>0.435              | 0.800<br>0.750              |

## 3. DIMENSIONAMIENTO Y PERFIL DE FLUJO SOBRE REJILLAS

Las ecuaciones las ecuaciones (16) y (21) corresponden a las ecuaciones para el cálculo de los perfiles de flujo a lo largo de rejillas de barras paralelas y de placa perforada respectivamente, las cuales al ser evaluadas para las condiciones de frontera que definen en inicio y el fin de la rejilla toman la forma presentada por las ecuaciones (17) y (22) que permiten el cálculo de la longitud de la rejilla.

Si bien el cálculo de la longitud de la rejilla no reviste mayor complejidad pues una vez determinada la pendiente de la rejilla es posible conocer los valores de los diferentes parámetros necesarios a partir de la Tabla 2, el procedimiento de determinar un valor definitivo para la longitud de la rejilla es un procedimiento de ensayo y error que puede tornarse tedioso en la medida que se deben realizar diferentes evaluaciones de longitud de rejilla.

Para facilitar esta evaluación, en este trabajo se construyeron las relaciones gráficas para la determinación de la longitud de la rejilla de barras paralelas o de placa perforada (las cuales se presentan en el Anexo 1) en términos de la inclinación de la rejilla, el caudal unitario que pasa sobre ella, así como de diferentes valores del factor de obturación  $f$ , para diferentes configuraciones de rejillas.

En la construcción de estos gráficos se ha considerado como límite máximo para el caudal unitario una magnitud de 0.5  $m^2/s$ , tal que, la longitud asociada, se considera la longitud máxima recomendada en términos constructivos.

### 3.1 CÁLCULO DEL PERFIL DE FLUJO SOBRE LA REJILLA

Para mostrar la importancia de determinar el perfil de flujo para diferentes caudales en el dimensionamiento de una rejilla, se considerará un canal rectangular en el cual se dispone de una bocatoma de fondo, con el objeto de captar, para propósitos de suministro a un sistema de acueducto, un caudal unitario de 0.15 m<sup>2</sup>/s, en una fuente superficial donde el caudal unitario sobre la rejilla puede alcanzar durante una creciente un valor máximo de 4.5 m<sup>2</sup>/s.

Del análisis de sedimentos de la fuente, se asigna un factor de obturación del 25%, para una rejilla de barras paralelas con espesor e= 1 cm y de espaciamiento entre las barras a= 1.5 cm, con una inclinación del 10%.

Con los datos así definidos, de la Figura 5 se obtiene una longitud máxima de la rejilla de 45 cm; luego, el cálculo del perfil de flujo se realiza con la ecuación (16) y de la Tabla 1 se tiene que: C<sub>v</sub>=1.55, C<sub>d</sub>=0.435, α'=0.615.

A partir de la longitud de rejilla seleccionada, la energía y la profundidad de flujo al inicio de la rejilla en términos de cualquier caudal sobre ella está dada por las ecuación (23) y el valor de y<sub>0</sub>/E<sub>0</sub>=0.449.

$$E_0 = 0.747 q_0^{2/3} \quad (24)$$

$$y_0 = 0.371 q_0^{2/3} \quad (25)$$

De esta forma, en la ecuación (16), con x=L=0.45, y=y<sub>L</sub>, se obtiene que:

$$y_L \sqrt{1 - 1.339 \cdot y_L \cdot q_0^{-2/3}} + 0.309 \cdot q_0^{2/3} - 0.0882 = 0 \quad (26)$$

Así mismo, de la ecuación (12b), se tiene que:

$$q_r = q_0 \left( 1 - 3.2363 q_0^{-2/3} y_L \sqrt{1 - \frac{1.339 y_L}{q_0^{2/3}}} \right) \quad (27)$$

**Tabla 2.** Características de la rejilla para caudal variable.

| q <sub>0</sub><br>(m <sup>2</sup> /s) | E <sub>0</sub><br>(m) | y <sub>0</sub><br>(m) | V <sub>0</sub><br>(m/s) | y <sub>L</sub><br>(m) | q <sub>r</sub><br>(m <sup>2</sup> /s) | q <sub>r</sub> /q <sub>0</sub> |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 0.15                                  | 0.211                 | 0.105                 | 1.43                    | 0.000                 | 0.150                                 | 1.000                          |
| 0.3                                   | 0.335                 | 0.166                 | 1.80                    | 0.054                 | 0.193                                 | 0.644                          |
| 0.6                                   | 0.531                 | 0.264                 | 2.27                    | 0.157                 | 0.241                                 | 0.401                          |
| 0.9                                   | 0.696                 | 0.346                 | 2.60                    | 0.248                 | 0.278                                 | 0.309                          |
| 1.2                                   | 0.844                 | 0.419                 | 2.86                    | 0.334                 | 0.307                                 | 0.255                          |
| 1.8                                   | 1.105                 | 0.549                 | 3.28                    | 0.498                 | 0.347                                 | 0.193                          |
| 2.4                                   | 1.339                 | 0.665                 | 3.61                    | 0.647                 | 0.385                                 | 0.160                          |
| 3                                     | 1.554                 | 0.772                 | 3.89                    | 0.792                 | 0.412                                 | 0.137                          |
| 3.75                                  | 1.803                 | 0.895                 | 4.19                    | 0.962                 | 0.447                                 | 0.119                          |
| 4.5                                   | 2.036                 | 1.011                 | 4.45                    | 1.130                 | 0.472                                 | 0.105                          |

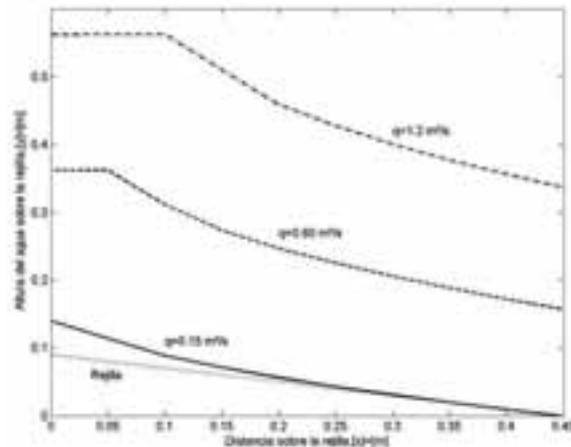
De esta forma, a partir de la solución de las ecuaciones (24), (25), (26), (27), se construye la Tabla 2 para diferentes caudales unitarios entre 0.15-4.2 m<sup>2</sup>/s.

La Figura 3, muestra los perfiles de flujo sobre la rejilla para q<sub>0</sub>=0.15, 0.6 y 1.2 m<sup>2</sup>/s, a partir de la ecuación (17) con m=0.196:

$$x = 5.102 \left( 0.83336 y_0 - y \sqrt{1 - \frac{y}{E_0}} \right) \quad (28)$$

La Tabla 2 presenta la variación del caudal q<sub>r</sub> captado para diferentes caudales de circulación sobre la rejilla q<sub>0</sub>, mientras que la Figura 3 indica los niveles del flujo sobre la rejilla para los diferentes caudales asociados.

De su análisis conjunto se observa como un valor exagerado de la longitud de la rejilla genera una captación de un caudal mayor al requerido, lo cual tiene implicaciones en la dinámica fluvial de la obra aguas abajo de la estructura de captación y que permite disponer de valores más confiables del caudal de excedencia bajo el cual se deben diseñar las posteriores obras de alivio, así como los vertederos de la obra.



**Figura 3.** Perfiles de flujo para diferentes caudales sobre la rejilla.

## 4. CONCLUSIONES

La condición de flujo espacialmente variado que se presenta sobre la rejilla de una captación de fondo no cuenta con una solución analítica que permita determinar la variación de la superficie de libre sobre la estructura de captación.

Esta situación ha generado, que el estudio del flujo sobre las rejillas se realice a partir del análisis experimental, produciendo expresiones de cálculo que tienen algunas

hipótesis que pueden ser cuestionables en algunos puntos, y que ha generado que la longitud de las rejillas se asigne en la práctica más con criterios empíricos o constructivos, que con base en la aplicación de metodologías que consideren aun con limitaciones una aproximación física coherente del fenómeno.

En esta medida, las relaciones gráficas presentadas en el Anexo 1 que corresponden al método de Mostkow, facilitan enormemente la labor de la determinación de la longitud de la rejilla, la cual se determina a partir de los gráficos construidos, una vez que se define el tipo de rejilla que se desea instalar únicamente en términos del caudal unitario que será captado. De esta forma, rápidamente, se puede conocer para diferentes caudales del régimen fluvial la longitud mínima necesaria de la rejilla, de forma tal que la obra de captación se diseñe de manera eficiente para el caudal que realmente se desea captar, considerando a su vez en el dimensionamiento de los vertederos el régimen de variabilidad del caudal superficial mediante la inclusión del análisis de los perfiles de flujo.

Bajo este mismo enfoque, se considera a futuro necesario evaluar el dimensionamiento de los drenajes de carreteras que en ocasiones presentan insuficiencias en la captación de los excedentes de precipitación, favoreciendo la desestabilización de las vías y llegando inclusive a ser un motivo de la accidentalidad vial.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

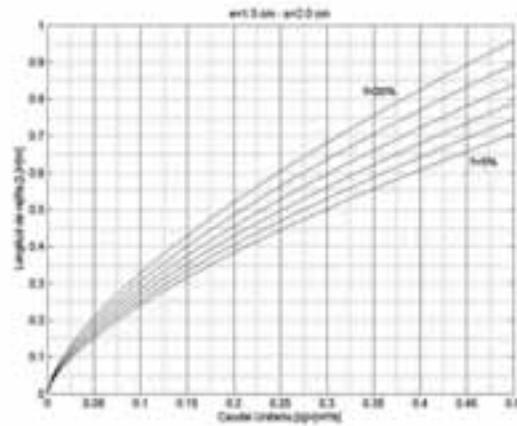
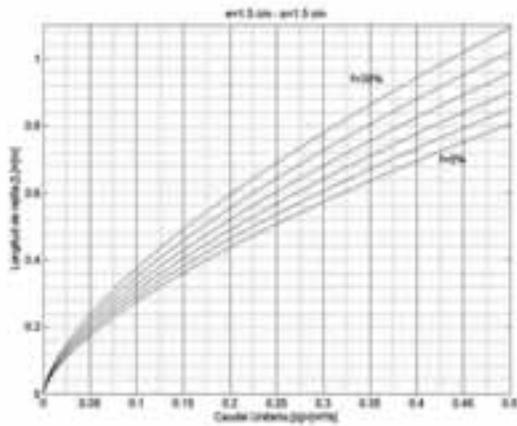
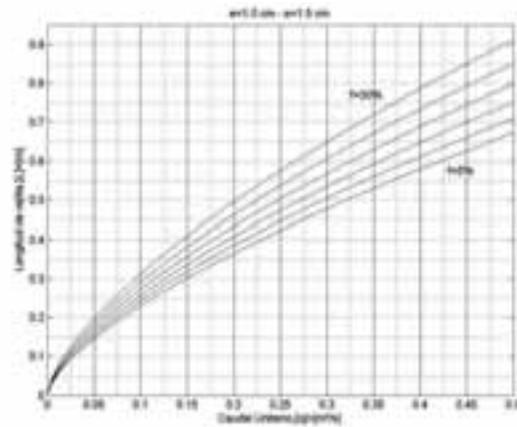
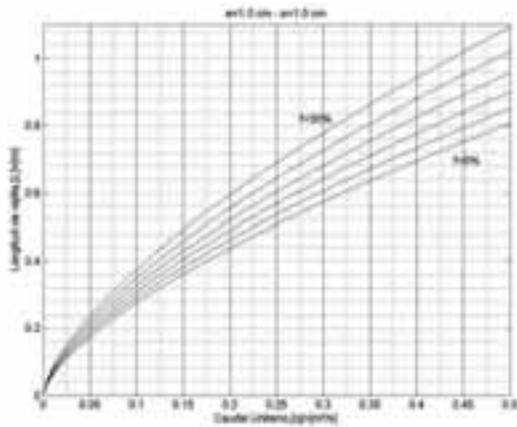
- [1] Mizuyama, T., and Mizuno, H. Behavior of debris flow at control structures. Proc., IAHR Int. Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements, C2.1–C2.12. 1994.
- [2] Viparelli, C. Dissipatori a griglia di fondo. Energ. Elettr., 7, p.509–519. 1963.
- [3] Righetti, M., Lanzoni, S. Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 1, January 1, p.15-22. 2008.
- [4] Sotelo A., G. Hidráulica de canales abiertos. 1ª edición, UNAM. 836 p. 2002.
- [5] Ackers, P.A. A theoretical consideration of side weirs as stormwater overflows. Proceedings of the institution of Civil Engineers, V.6, pp.305, Londres, 1957.
- [6] De Marchi G. Saggio di teoria del funzionamento degli stramassi laterali. L'Energia Ellettrica, Milán, V.II, No. 11, pp.849, Noviembre. 1934.
- [7] Frank, J., Von Obering, E. Hydraulische Untersuchungen für das Tiroler Wehr. Der Bauingenieur, 31, Helf 3. p 96-101. 1956.
- [8] Mostkow, M. Sur le calcul des grilles de prise d'eau (Theoretical study of bottom type water intake). La Houille Blanche, V.4, pp. 569-576. 1957.
- [9] Nosedá, G. Operation and design of bottom intake racks. Proc., VI General Meeting IAHR, Vol. 3, The Hague, C17-1–C17-11. 1955.
- [10] Zamarin, E.A., Popow, K.W., Fandjew W.W. Wasserbau. VEB Verlag für Bauingenieur, Heft 3, pp.96-101. 1956.
- [11] Hager, W. Discussion of Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks Righetti and Lanzoni, S. Journal of Hydraulic Engineering, January 2008. Vol. 134, No. 1, pp. 15-22. JHE, ASCE/October 2009/ p. 865-868.
- [12] Venkataraman, P., Nasser, M. S., and Ramamurthy, A. S. Flow behavior in power channels with bottom diversion works. Proc., XVIII IAHR Conf., Vol. 4, Cagliari Italy, p. 115–122. 1979.
- [13] Brunella, S., Hager, W., Minor, H.E. Hydraulics of Bottom Rack Intake. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, No. 1, January 1, p-2. 2003.
- [14] Castillo Elsitdié, L.G; Lima Guamán, P. Análisis del dimensionamiento de la longitud de reja y del canal lateral en una captación de fondo - XXIV congreso latinoamericano de hidráulica, Punta del este, Uruguay, Noviembre 2010.
- [15] Subramanaya, K. Flow in open channels. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill. 549 p. 2009.
- [16] French, R. Hidráulica de canales abiertos. Mc-Graw Hill. 794 p. 1998.
- [17] Chow, V. T. Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill. 406 p. 1994
- [18] Naudascher E. Hidráulica de Canales. Ed. Limusa. 381 p. 2001.
- [19] Hager W.H. – Open channel hydraulics of flows with increasing discharge. Journal of Hydraulic Research. IAHR, V.21, No.3, pp.177-193, 1983.
- [20] Materón, Hernán – Obras hidráulicas rurales – Editorial Universidad del Valle p.323.

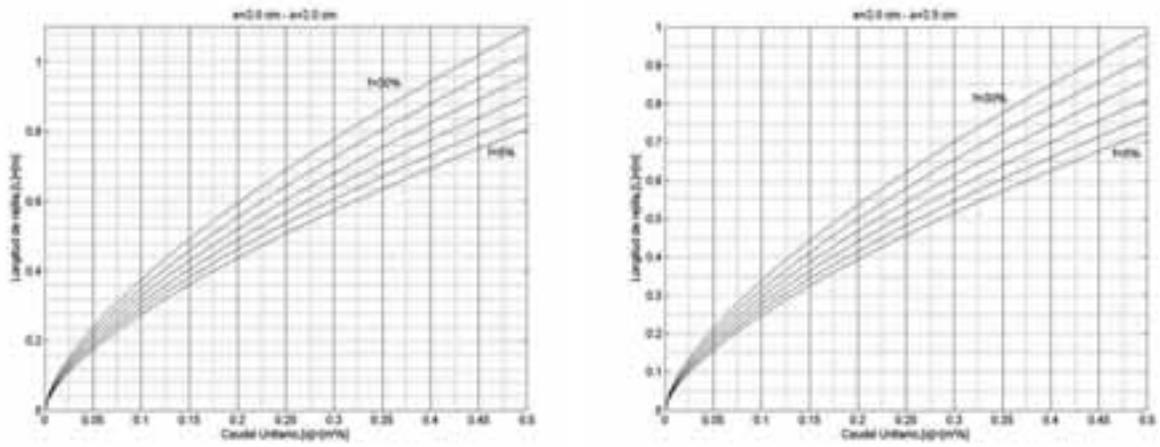
## 5. ANEXO.

### Relaciones gráficas para la determinación de la longitud de la rejilla en una bocatoma de fondo.

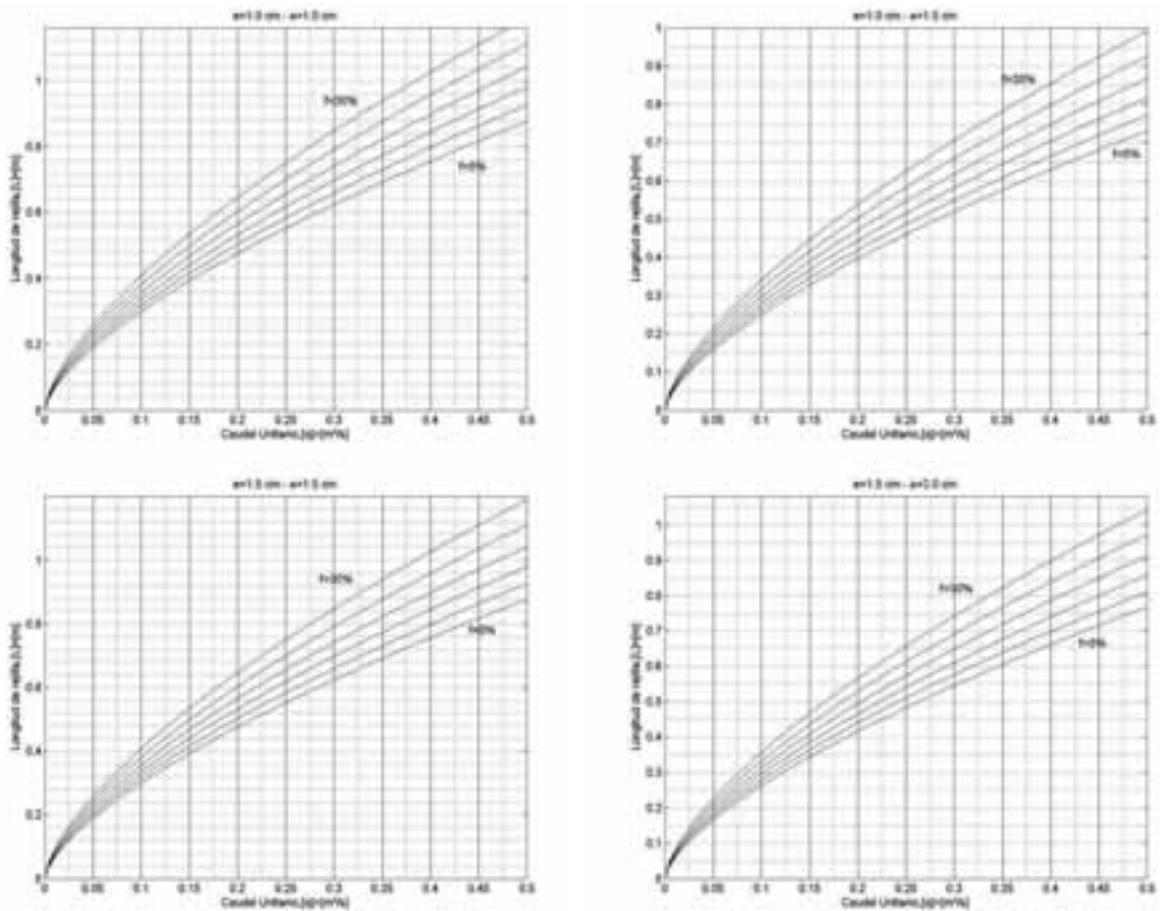
Se presentan a continuación las relaciones gráficas de las ecuaciones (17) y (22), que permiten determinar la longitud de rejilla  $L$  de barras paralelas o de placa perforada, en términos del caudal unitario  $q$  que pasa sobre ella según el trabajo de Mostkow[8].

Las figuras 4, 5 y 6 se aplican a rejillas de barras paralelas para inclinaciones de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $20^\circ$ , donde  $e$  es el espesor de las barras,  $a$  es la abertura entre las barras y  $f$  corresponde al porcentaje de obstrucción de la rejilla el cual varía entre el 5% y el 30%.





**Figura 4.** Longitud de rejilla de barras inclinadas para  $\theta=0^\circ$



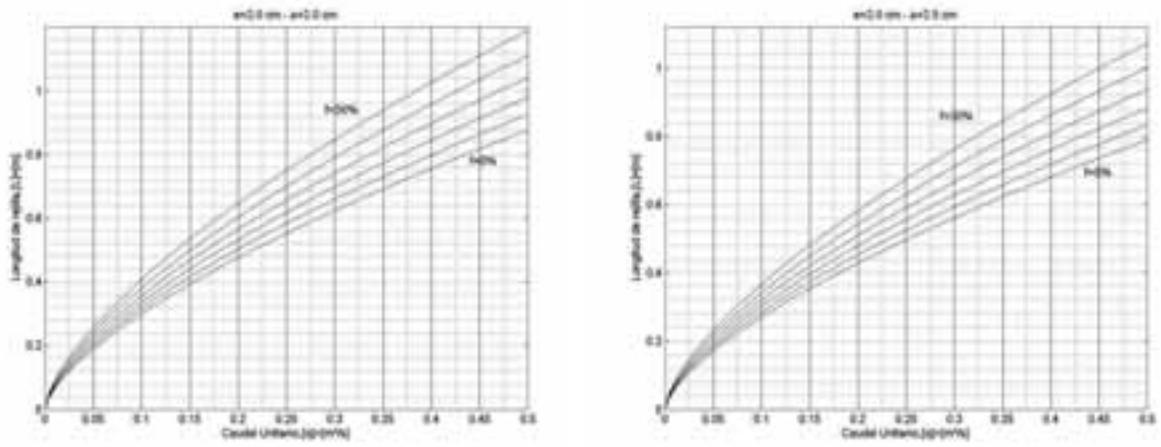
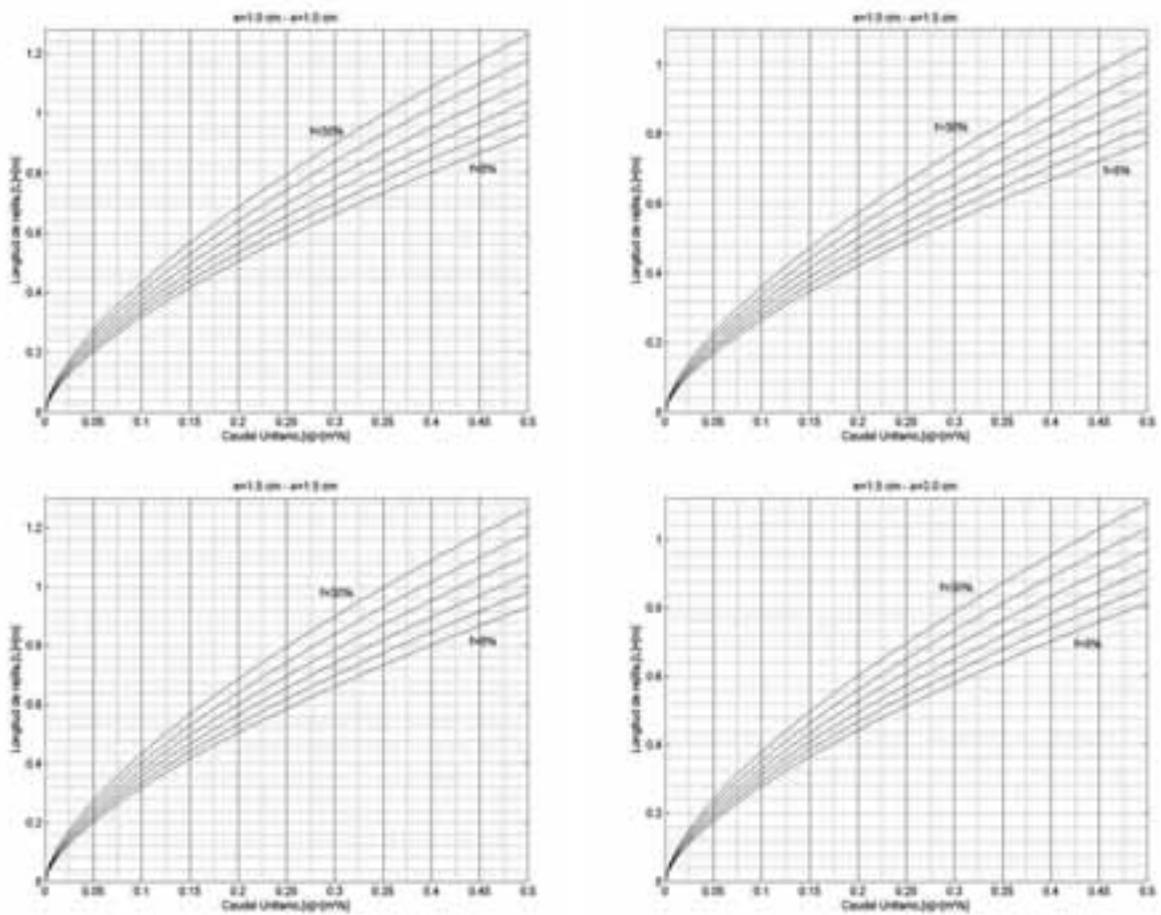
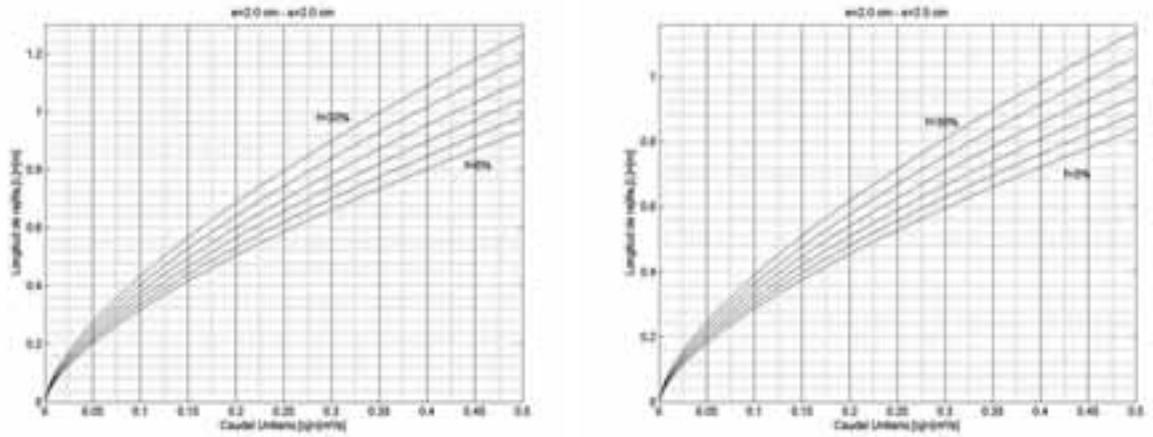


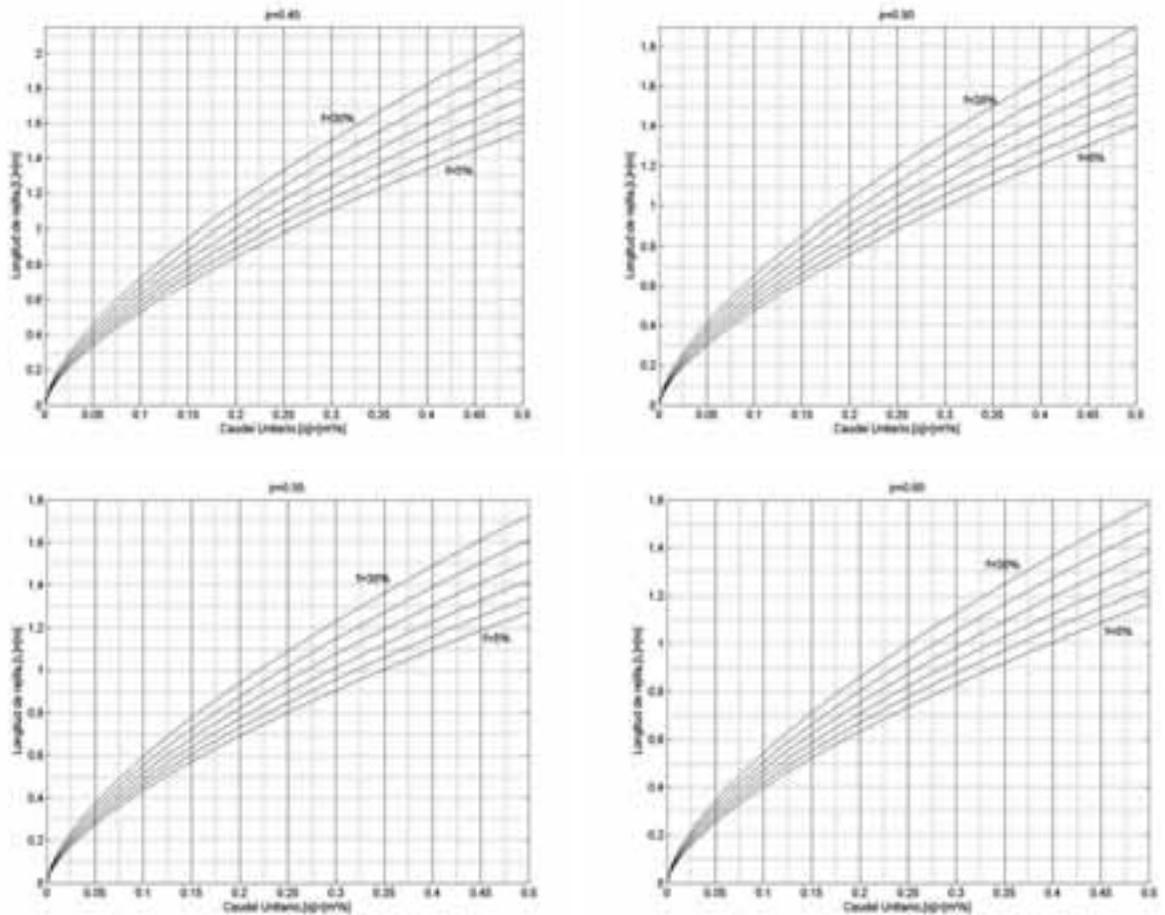
Figura 5. Longitud de rejilla de barras inclinadas para  $\theta=10^\circ$



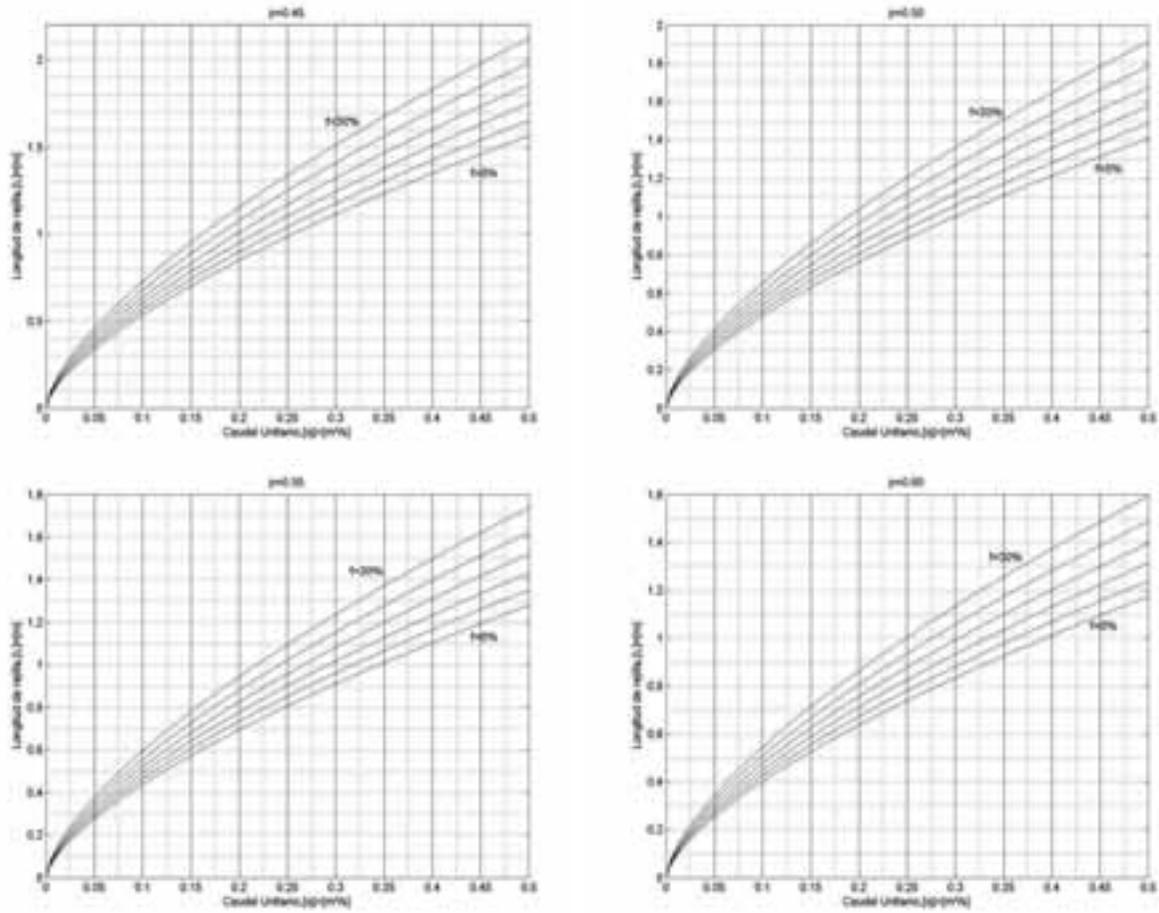


**Figura 6.** Longitud de rejilla de barras inclinadas para  $\theta=20^\circ$

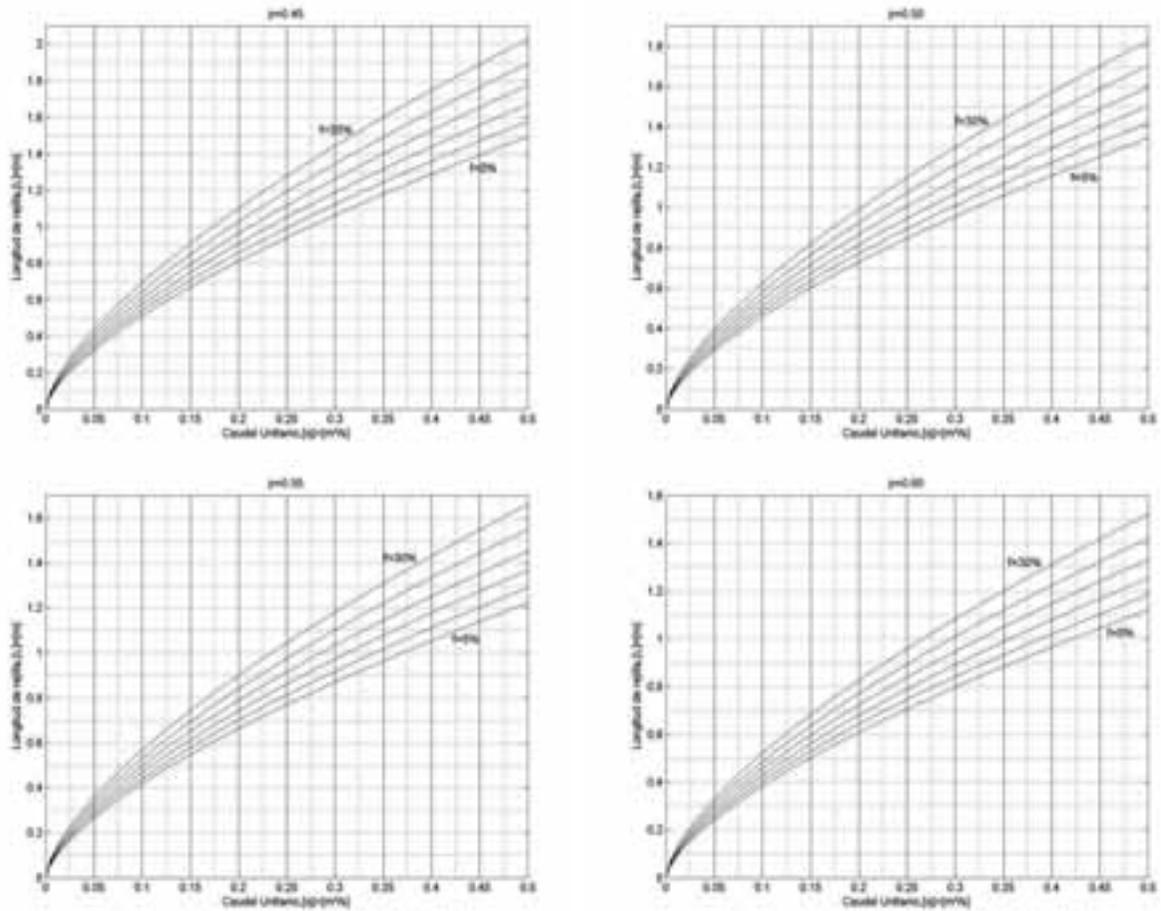
Las figuras 7, 8 y 9 se aplican a rejillas de placa perforada para inclinaciones de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $20^\circ$ , donde  $p$  es el coeficiente de porosidad de la rejilla, que se calcula en el caso de una placa perforada como la relación entre del área de paso del flujo a través de la placa y su área total.



**Figura 7.** Longitud de rejilla para placa perforada con  $\theta=0^\circ$ .



**Figura 8.** Longitud de rejilla para placa perforada con  $\theta=10^\circ$ .



**Figura 9.** Longitud de rejilla para placa perforada con  $\theta=20^\circ$ .