

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE REJILLAS EN BOCATOMA DE FONDO

J.A. Pérez, C. Quiceno, M. Botero, A.F. Cano G.  
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

## RESUMEN

Las rejillas que hacen parte de una estructura de captación se diseñan, normalmente, utilizando un procedimiento matemático que luego es afectado por un amplio factor de seguridad. Con dicho procedimiento se encuentra que cualquier tipo de rejilla con espesor y separación de barras aceptados por las normas del país, cumple con la captación del caudal requerido. Tratando de racionalizar el diseño se realiza este estudio experimental en una bocatoma de fondo cuya rejilla está ubicada por debajo del vertedero de rebose. Se experimentó con rejillas de barras redondas, de diámetros comerciales, para evaluar el comportamiento del flujo a través de ellas. Los ensayos se efectúan utilizando un modelo a escala natural, manipulando algunas de las variables más importantes en el comportamiento del flujo a través de dicha rejilla para proponer un procedimiento de diseño más racional.

## ABSTRACT

Metal bar screens as part of the water intake structures has been normally designed by means of a mathematical procedure and then a wide security factor is applied. By doing this, any kind of screens with bar thickness and separation according to the national normativity fits the hydraulic design for the required intake discharge. Trying to rationalize the design, an experimental study is conducted over a bottom intake whose screen is usually located below the low-flow spillway. The experimental work considered round bar screens of commercial diameters to evaluate the behaviour of the flow through the screen. Tests were made over a natural scale model (prototype), and some of the hydraulic variables that have more influence on the flow behaviour through this type of screen were manipulated to propose a more rational hydraulic design procedure.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la literatura técnica referente al tema de flujo a través de rejilla, se encuentran expresiones teóricas que exigen, para su validez, condiciones ideales imposibles de llevar a la práctica. Sin embargo, estas expresiones teóricas son la base fundamental para el diseño.

Para facilitar el trabajo del diseñador, existen algunas guías y cartillas de diseño que contienen ayudas para dimensionar las estructuras de captación y escoger, de manera eficiente, el tipo de rejilla y dispositivos adicionales necesarios para la aducción del flujo aguas abajo. Nicolás Nyerges V. (1962), en su libro "Obras de captación en cursos superficiales de agua para gastos moderados", explica algunos métodos sencillos para el diseño de varios tipos de obras de captación.

Los coeficientes de la rejilla, utilizados en las ayudas de diseño fueron hallados con rejillas de barras cuadradas implicando que, a la hora de diseñar con barras redondas, existan ciertas diferencias.

El trabajo experimental que fundamenta el presente trabajo se realizó sobre un modelo a escala natural de una bocatoma de fondo. La Figura 1 muestra un esquema de la estructura de captación donde se indican las variables principales para describir el comportamiento del flujo. La Figura 2 presenta un esquema en planta del montaje utilizado en el laboratorio donde se indican los elementos principales que controlan el flujo. Un detalle del tipo de rejilla utilizado se muestra en la Figura 3.

Variando el diámetro y separación de las barras (Figura 3) y la pendiente de la cresta del vertedero se encuentra, de manera aproximada, el aporte de estas variables en el comporta-

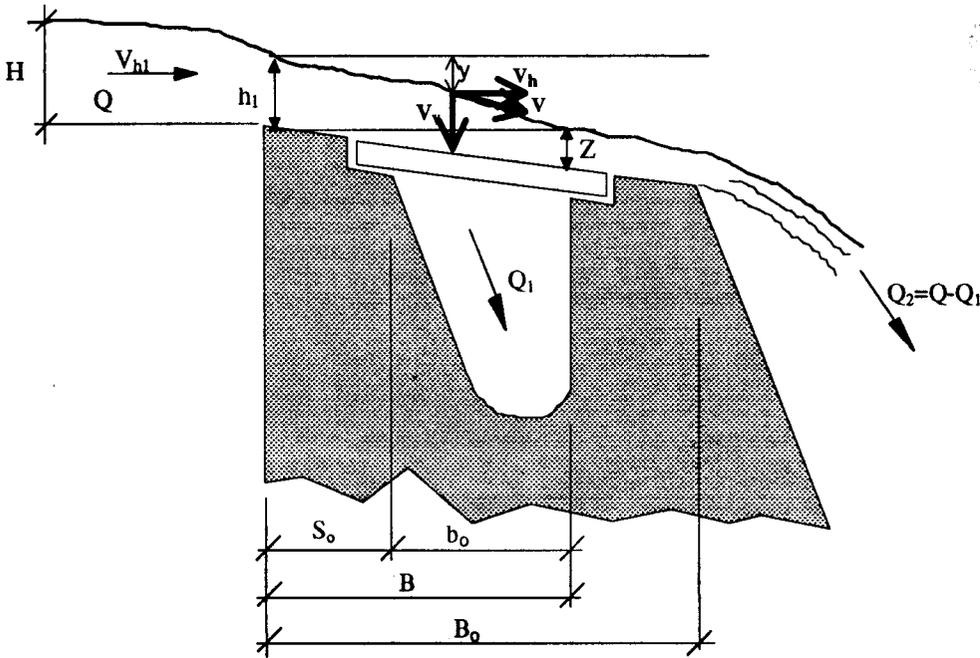
miento del sistema completo y se analizan las tendencias del flujo al cambio de estas variables. Se obtienen valores del coeficiente de contracción para rejillas fabricadas con barras redondas; adicionalmente se determina la influencia que tiene la colocación de mallas encima de la rejilla. Finalmente se ensaya una alternativa en cuanto al aprovechamiento parcial del vertedero de rebose haciendo que la rejilla ocupe parcialmente dicho vertedero en una longitud suficiente que cumpla con el objetivo de captar el caudal requerido. El porcentaje del caudal captado con respecto al caudal de aproximación se relaciona con el porcentaje de ocupación de la rejilla en el vertedero de rebose.

Con base en los resultados obtenidos se presentan ayudas gráficas de diseño que permiten determinar fácilmente el tipo de rejilla a utilizar, teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura de captación y se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones que sirven de ayuda para el diseño de este tipo de obras.

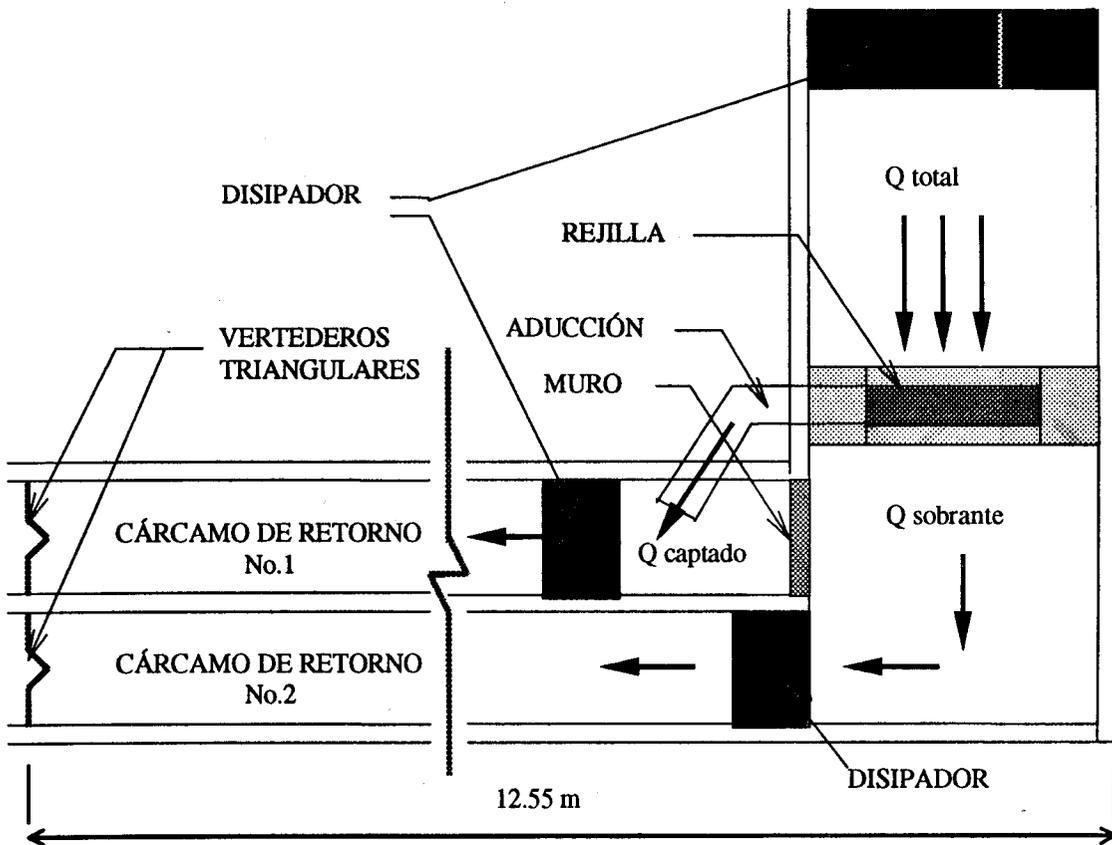
## 2. MODELO DE LA BOCATOMA

Se construyó un dique en hormigón reforzado y una tubería de PVC de seis pulgadas para conducir el agua desde la rejilla hasta el canal de aforo. Para el diseño del modelo se consideraron dimensiones a escala natural con el fin de facilitar la comparación de resultados con las expresiones teóricas y experimentales; se escogieron dimensiones con órdenes de magnitud similares a las propuestas por Nyerges (2).

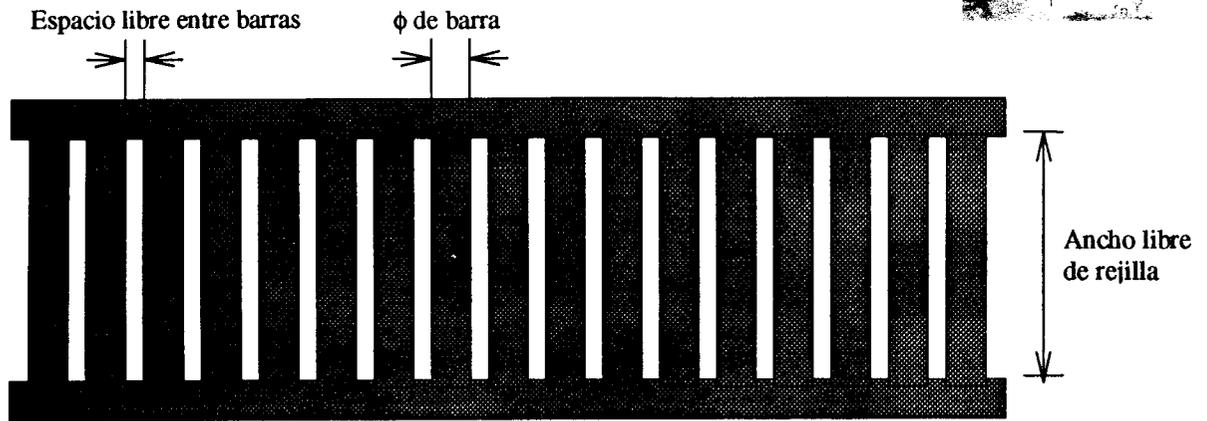
Las rejillas fueron construidas con barras de hierro lisas, de diámetro  $\phi$  3/8", 5/8" y 6 mm, unidas con perfiles de 1" x 1/8". En total, se utilizaron cinco rejillas diferentes como se indica en la Tabla 1:



**FIGURA 1.** Variables de la estructura de captación involucradas en las expresiones teóricas. Nyerges (2), p. 56.



**FIGURA 2.** Esquema en planta del montaje realizado.



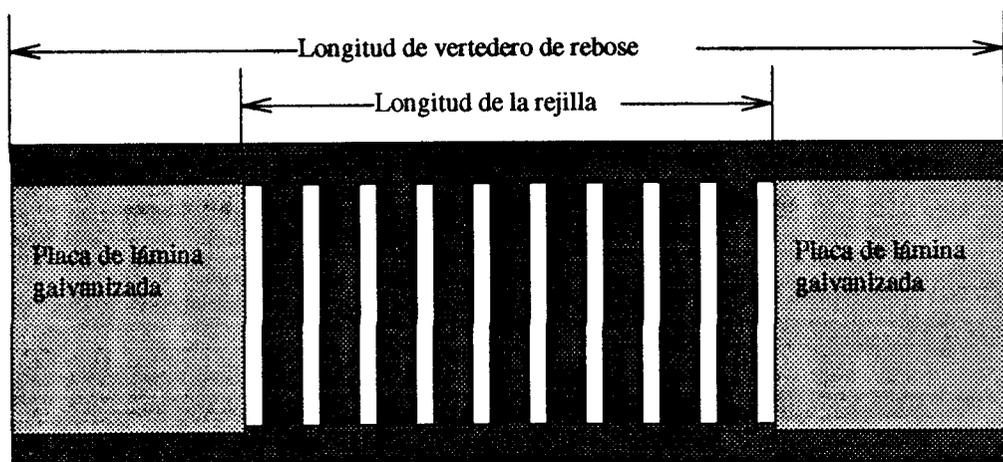
**FIGURA 3.** Variables de la rejilla involucradas en las expresiones teóricas.

**TABLA 1.** Dimensiones de rejillas.

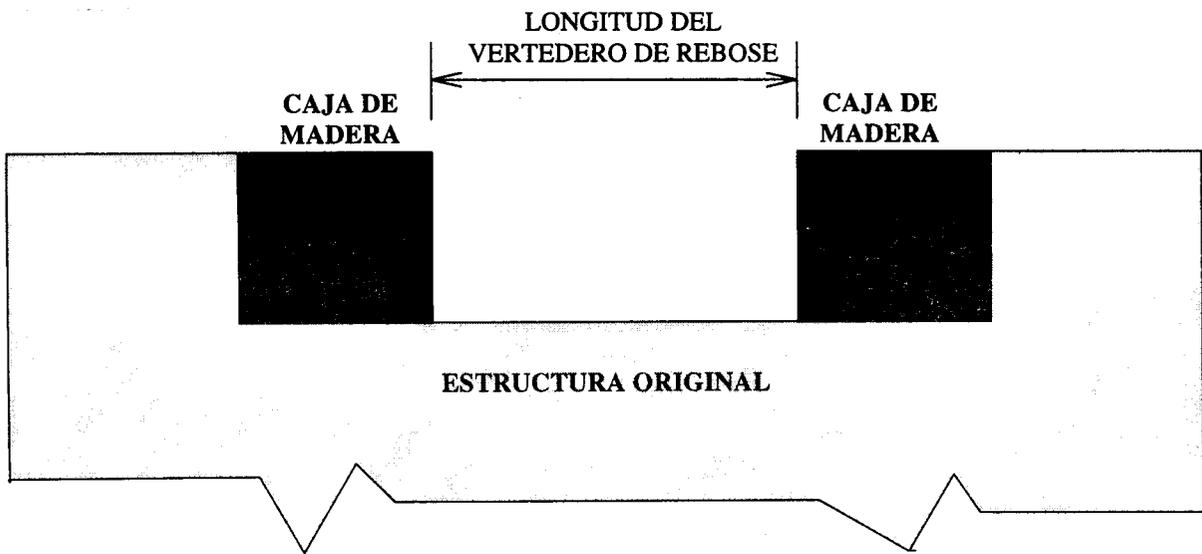
Díámetro $\phi$	Separación libre entre barras, (cm)
3/8"	1.5
3/8"	2.0
5/8"	1.5
5/8"	2.0
6 mm	0.5

Para lograr un aprovechamiento parcial del vertedero de rebose, por parte de la rejilla, se colocaron sobre ella (Figura 4), unas placas

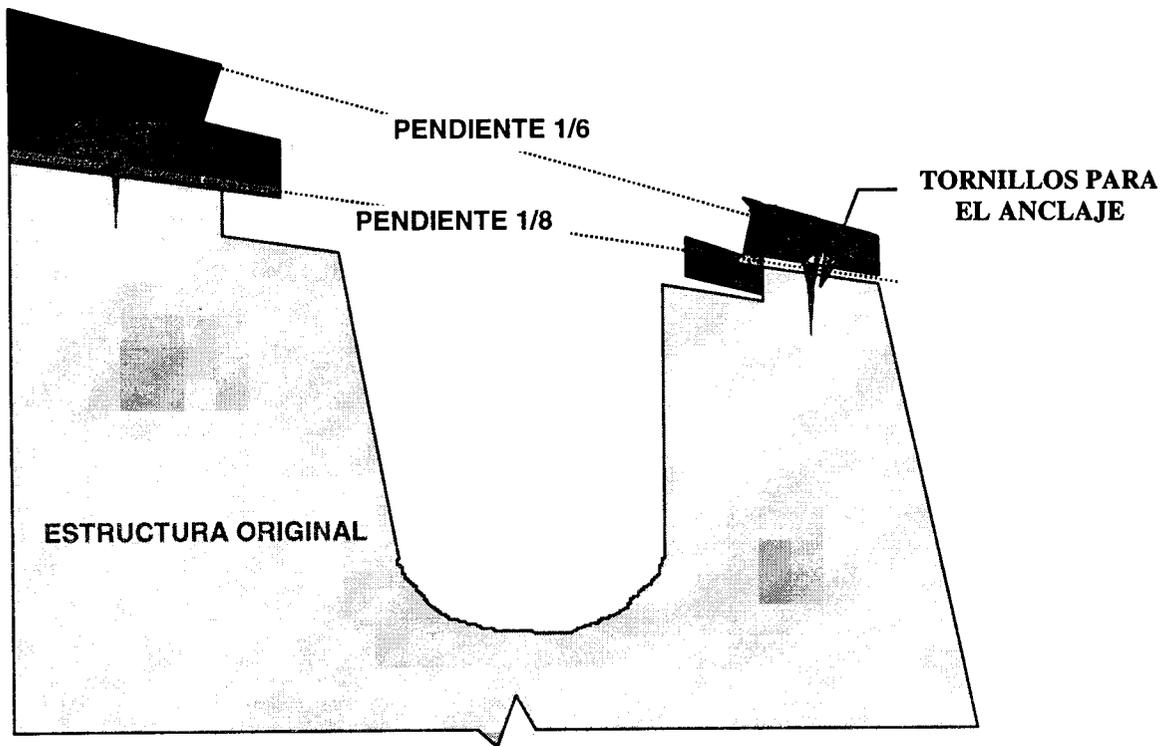
de lámina galvanizada de diferentes tamaños, para disminuir la longitud y el área efectiva de la rejilla con una longitud de vertedero constante. Debido a que la estructura se hizo en hormigón reforzado, la pendiente de la cresta y las dimensiones del vertedero de rebose son fijas. Sin embargo, se utilizaron unos dispositivos de madera, pegados a la estructura con tornillos (Figuras 5 y 6), para disminuir la longitud del vertedero de rebose y variar la pendiente.



**FIGURA 4.** Variación de la longitud de la rejilla por medio de placa (vista en planta).



**FIGURA 5.** Variación de la longitud del vertedero de rebose por medio de cajas (vista frontal).



**FIGURA 6.** Variación de la pendiente de la cresta del vertedero (perfil).

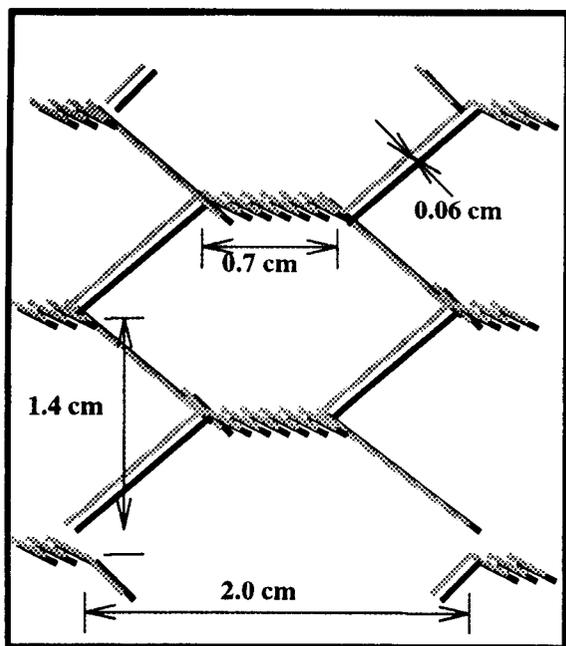


FIGURA 7a). Malla de "pajarito".

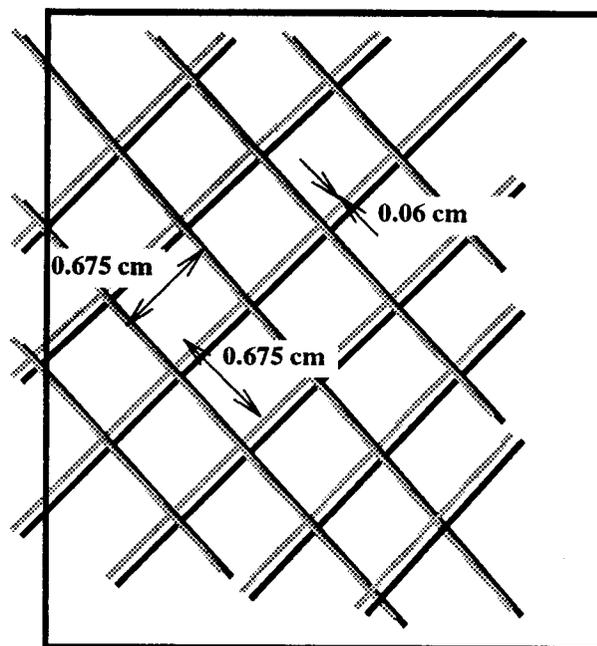


FIGURA 7b). Malla de "zaranda".

## 1. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

El proceso para cada caso comenzaba tanteando caudales con ayuda de la válvula, hasta obtener el caudal máximo permitido por el sistema, evitando el ahogamiento de la rejilla, de la tubería de aducción y de los vertederos de aforo. Luego de que cada uno de los caudales utilizados se estabilizara, se tomaban las lecturas necesarias con los limnómetros, procediendo luego a disminuir el caudal, repitiéndose el proceso anterior hasta llegar al caudal mínimo apreciable para las lecturas.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La simplificación del cálculo hecha por Nicolás Nyerges se basa en las siguientes consideraciones:

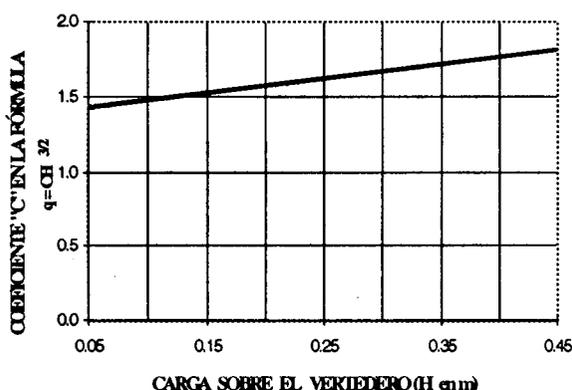
- a. Si bien la forma exacta de un vertedero y el régimen de flujo tienen suma importan-

cia en mediciones de gasto, por ejemplo, para los efectos de funcionamiento del dispositivo de captación en caso de gastos moderados, la aproximación de fórmulas experimentales parece ser suficiente.

Los valores de las descargas relativas se basan en los trabajos experimentales de Bazin, Belanger, Rehbock, Rafler, etc. y se concluye que el máximo rango de variación en la relación entre descarga  $q$  por siete tipos diferentes de vertederos, y la descarga  $q_1$  por un vertedero de pared delgada de lámina libre, es de 0.89 a 1.24 para cargas comprendidas entre 0.1 m y 0.5 m. Si se comparan solamente los casos que tienen alguna similitud con el vertedero que se está estudiando, el rango de variación de  $q/q_1$  se reduce a valores comprendidos entre 0.89 y 1.07. Se debe anotar que hojas o ramas atrapadas por la rejilla causarían probablemente mayor variación en el gasto que el empleo arbitrario de cualquier fórmula experi-

mental dentro de ese rango y, habrá que aplicar un coeficiente de seguridad a fin de asegurar la captación del gasto requerido, aún en caso de obstrucciones parciales de la rejilla.

- b. Basándose en las consideraciones anteriores y haciendo referencia a la Figura 1, se puede estimar la carga H con base en la fórmula  $q = C H^{3/2}$ , adoptando el 90% del valor de los coeficientes C de la Gráfica 1.



**GRÁFICA 1.** Coeficiente C en la fórmula general de vertederos rectangulares. Nyerges (2), p. 60.

- c. La carga H sobre la cresta impartirá al agua una velocidad horizontal  $V_h$ , cuyo valor puede calcularse con base en el teorema de Bernoulli,

$$V_h = \sqrt{2g(H - h_1)} \quad (1)$$

$$q = h_1 \sqrt{2g(H - h_1)} \quad (2)$$

siendo q el caudal por metro lineal de cresta. Despreciando los efectos de fricción y turbulencia,  $V_h$  puede considerarse constante a lo ancho de la cresta, suposición que no se verifica en la práctica, pero que para los efectos de un cálculo aproximado es aceptable. Nótese

que en esta forma se está por el lado de la seguridad, ya que ante cualquier tendencia de "frenar" el flujo, la entrada del agua a la rejilla se verá favorecida, llegando al caso extremo en que el valor inicial de la velocidad horizontal tiende a cero y la descarga de la rejilla dependerá básicamente de  $\sqrt{2gy}$ .

- d. En vista de que la cresta está inclinada hacia aguas abajo con una pendiente determinada, el comportamiento de la lámina de agua será similar al de un chorro libre; por lo tanto, empezará a actuar una componente vertical  $V_y$  de la velocidad y la lámina tenderá a curvarse hacia abajo. La cara inferior de la lámina se acercará a la cresta del vertedero en el momento en que la pendiente del desplazamiento sea mayor a la de la cresta, tocándola a una distancia horizontal, x, del borde agudo del vertedero. La resultante V se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{V_h^2 + 2gy} \quad (3)$$

El valor de "y" está dado por la fórmula (4), donde  $K = \frac{g}{2V_h^2}$  :

$$y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{V_h^2} = Kx^2 \quad (4)$$

- e. A partir del punto en que la inclinación de la resultante V sea mayor que la de la cresta, habrá una tendencia del chorro a penetrar en la rejilla. Se podrá captar el gasto  $Q_1$  siempre y cuando haya un área de penetración suficiente. Llamando dq al caudal captado por ancho diferencial de cresta dx, se tiene expresión (5):

$$dq = C_2 C_1 V dA_p \quad (5)$$

donde  $C_1$  es el porcentaje de la longitud útil de penetración (es decir, la longitud libre por metro lineal de cresta, descontando el espacio ocupado por las barras de la rejilla);  $C_2$  es el coeficiente de contracción de dicha rejilla, y  $dA_p$  es el área diferencial de penetración, perpendicular a la resultante, dada por la expresión (6).

$$\frac{dA}{dA_p} = \frac{V_y}{V} ; dA_p = \frac{V}{V_y} dA \quad (6)$$

Debido a que se trabaja por metro lineal de cresta, el área  $dA$  será igual a  $dx$ . Después de combinar las expresiones (3), (4), (5) y (6), la ecuación del gasto toma la siguiente forma:

$$dq = C_2 C_1 \frac{V_h^2 + 2gKx^2}{\sqrt{2gKx}} dx \quad (7)$$

- f. La integral de  $dq$  es igual a  $Q_1$ . El límite superior de la integral en el lado derecho es  $B$ ; el límite inferior es " $s$ ", la distancia entre el punto en que empieza la entrada del gasto de captación a la rejilla; es decir, cuando la inclinación de la resultante,  $V(V_y/V_h)$ , sea mayor que la inclinación de la cresta del vertedero,  $Z/B$ . Se obtiene entonces la siguiente expresión para " $s$ ":

$$x \geq \frac{Z}{gB} V_h^2 = s \quad (8)$$

Es de notar que la distancia  $s$  es independiente del gasto de captación, y depende exclusivamente de la inclinación de la cresta y velocidad horizontal de flujo. La expresión que se obtiene para el gasto es la siguiente:

$$Q_1 = C_2 C_1 \left[ \frac{V_h^2}{g} \ln \frac{B}{s} + \frac{g}{2V_h} (B^2 - s^2) \right] \quad (9)$$

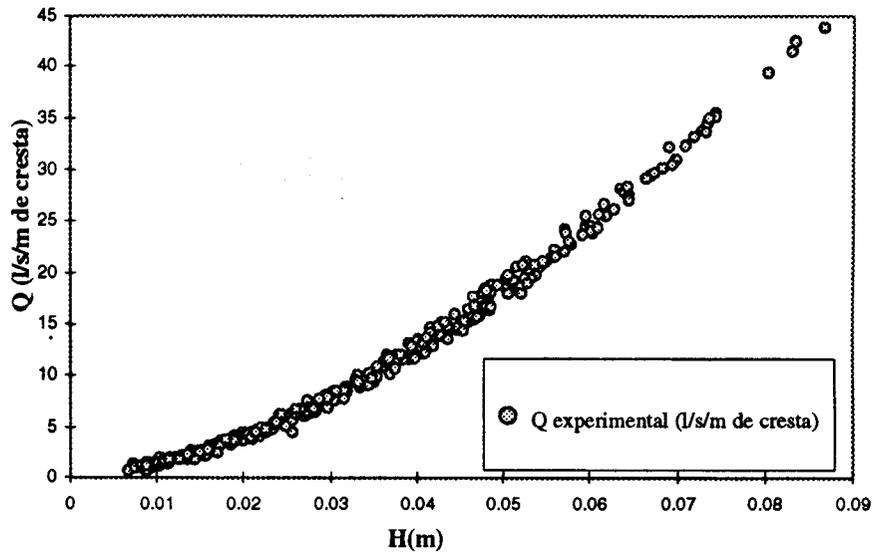
Cuando  $s$  resulte menor que  $S_0 = (B - b_0)$ , el límite inferior de la integral debe ser  $S_0$ . Evidentemente esta circunstancia modificará las condiciones exactas del flujo. Si se considera que la lámina de agua tenderá a curvarse hacia la rejilla antes del borde superior de ésta, bastará por consiguiente, sustituir  $S_0$  por  $s$  en la fórmula del gasto.

## 5. RESULTADOS.

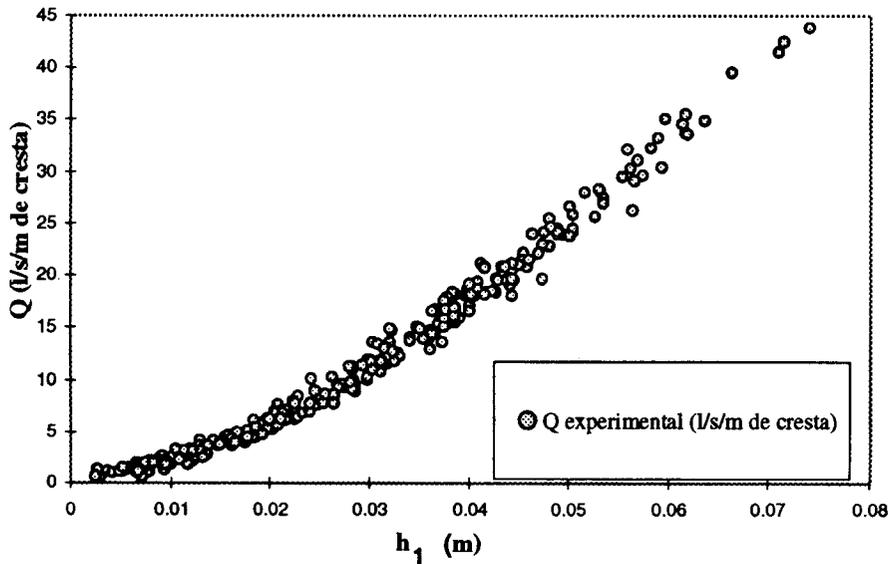
Para los 38 casos, se logró registrar un total de 288 caudales, discriminando el caudal captado y el caudal sobrante y, confrontando cada caudal con las lecturas de  $H$ ,  $h_1$  y la distancia a la cual la cara superior de la napa de agua pasaba a través de la rejilla.

Con la totalidad de los datos, se quiso verificar en primer lugar, la tendencia de las curvas de descarga por metro lineal de cresta de vertedero en función de las cargas  $H$  y  $h_1$ , para compararlas con las curvas presentadas por Nyerges. En las siguientes gráficas se presentan los datos obtenidos.

Para aquellos casos en los cuales la rejilla no ocupa el 100% de la longitud del vertedero de rebose, se buscó una relación entre el porcentaje captado del caudal total y el porcentaje de longitud de vertedero de rebose ocupado por la rejilla (Figura 4), para observar las tendencias seguidas por esta relación y evaluar la posibilidad de usar esta alternativa en casos prácticos según las necesidades. Para cada una de las rejillas construidas, exceptuando la fabricada con barras de 6 mm, se analizaron tres casos para el aprovechamiento parcial del vertedero de rebose, correspondientes al 75%, 62.5% y 50%.



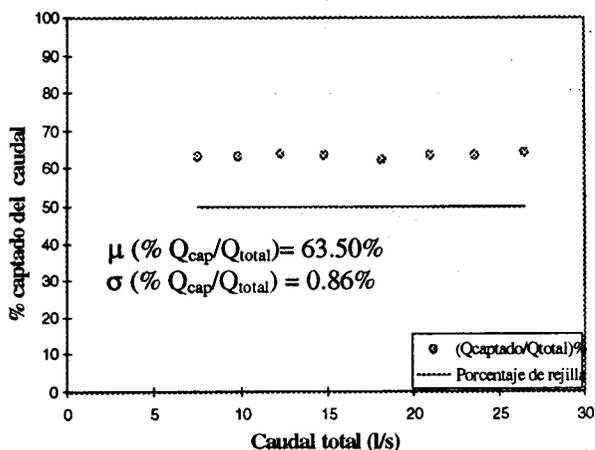
**GRÁFICA 2.** Valores medidos del caudal por metro lineal de cresta en función de  $H$  (m) experimental, para todos los casos.



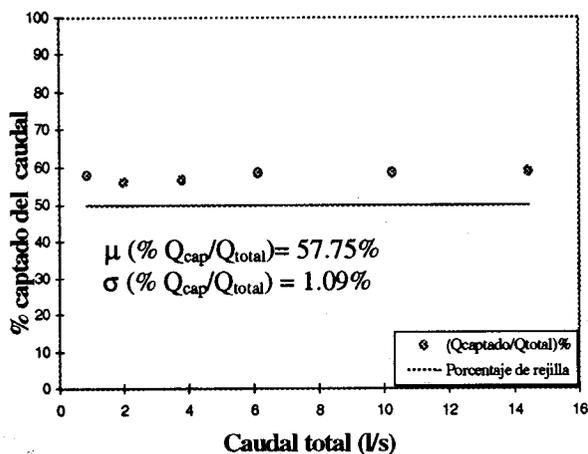
**GRÁFICA 3.** Valores del caudal aforado por metro lineal de cresta en función de  $h_1$  (m) experimental, para todos los casos.

En las siguientes gráficas, y a manera de información, se presentan los resultados correspondientes al 50% de captación, para la rejilla construida con barras de  $\phi = 5/8''$

separadas 1.5 cm, con pendientes de 1V:8H y 1V:6H; además se muestra el valor promedio de los datos y su respectiva desviación estándar para los demás casos.



**GRÁFICA 4.** Porcentaje captado del caudal total, con rejilla de barras  $\phi$  5/8" separadas 1.5 cm ocupando un 50% del vertedero de rebose, con pendiente 1/8.



**GRÁFICA 5.** Porcentaje captado del caudal total, con rejilla de barras  $\phi$  5/8" separadas 1.5 cm ocupando un 50% del vertedero de rebose, con pendiente 1/6.

Se presentan a continuación los resultados de la media y la desviación estándar del porcentaje captado del caudal total, para los casos en que la pendiente de cresta del vertedero era de 1/8:

Características de la rejilla			$\mu$ ( $Q_{cap}/Q_{total}$ ) (%)	$\sigma$ ( $Q_{cap}/Q_{total}$ ) (%)
$\phi$ (pulgadas)	Separación (cm)	% de ocupación		
5/8	1.5	75.0	86.15	1.80
5/8	1.5	62.5	76.12	1.43
5/8	2.0	75.0	87.28	1.28
5/8	2.0	62.5	76.16	1.59
5/8	2.0	50.0	62.96	1.87
3/8	1.5	75.0	86.59	1.78
3/8	1.5	62.5	76.23	1.02
3/8	1.5	50.0	63.54	0.40
3/8	2.0	75.0	87.34	1.04
3/8	2.0	62.5	76.86	0.33
3/8	2.0	50.0	63.62	0.56

Las expresiones de diseño propuestas por Nyerges (Ecuación 10), suponen que parte del caudal de aproximación es captado y parte sobrepasa la rejilla; es decir, la rejilla aprovecha todo el ancho  $b_0$ , para captar el

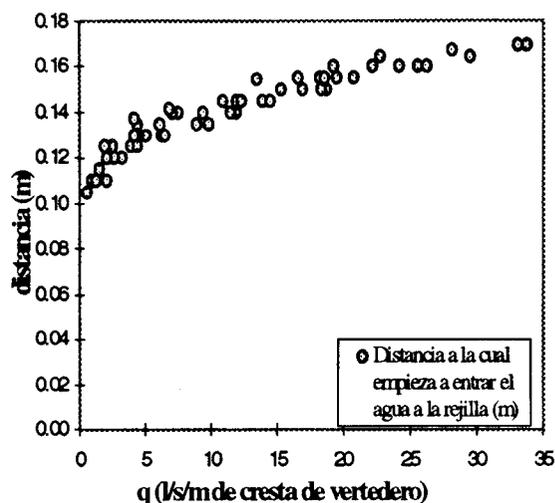
agua. En el modelo se observó que, para el manejo de caudales moderados, la geometría escogida para las rejillas obligaba a que todo el caudal de aproximación fuera captado.

Teniendo en cuenta lo anterior y con el propósito de encontrar el coeficiente de contracción  $C_2$ , de la Ecuación (10), fue necesario cambiar el límite superior de las integrales en la Ecuación (9), por el valor de la distancia  $B'$ , a la cual, la cara superior de la napa pasaba a través de la rejilla. En la Grafica 6 se muestran los valores de  $B'$  en función del caudal aforado por metro lineal de cresta de vertedero, para una rejilla con pendiente de 1/8, construida con barras de  $\phi$  5/8", separadas 1.5 cm

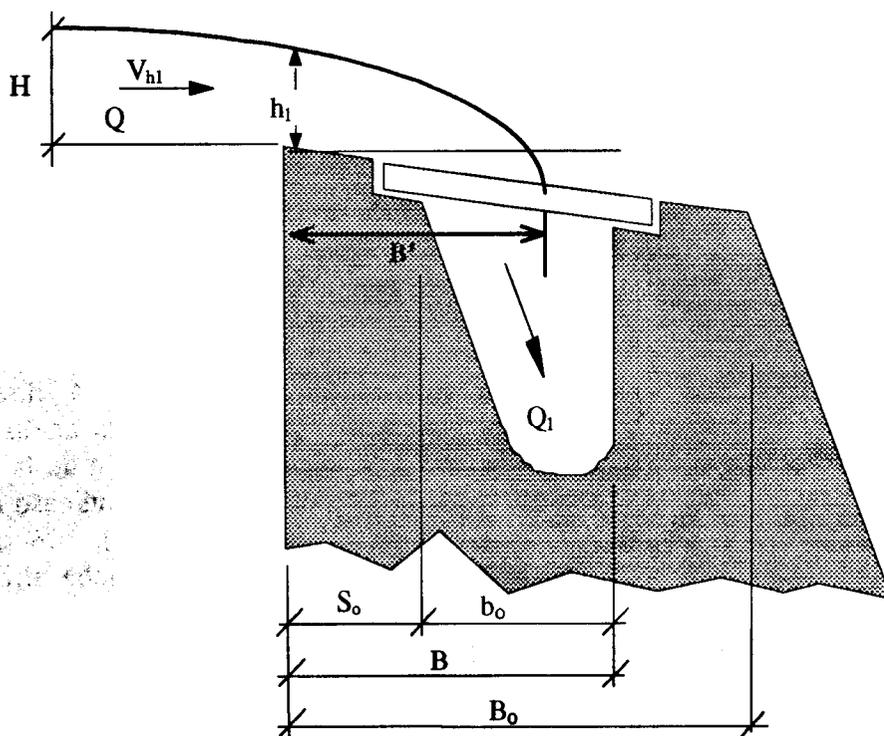
Resumiendo, el procedimiento para hallar los coeficientes de contracción  $C_2$  en función del caudal a captar, es el siguiente:

- Suponer en cada caso, el ancho  $B$ , de la rejilla igual a la distancia  $B'$  como se muestra en la Figura 8.
- Despejar el coeficiente  $C_2$  de la Ecuación (14), en función de  $V_{h1}$ ,  $B'$ ,  $S_o$ ,  $C_1$  y  $q$ .

- Tabular y graficar  $C_2$  en función de  $q$  ( $l/s/m$  de cresta) aforado para cada caso.



**GRÁFICA 6.** Distancia  $B'$  a la cual entra el agua en la rejilla de barras  $\phi$  5/8", separadas 1.5 cm, para una pendiente de vertedero de 1/8.



**FIGURA 8.** Distancia  $B'$  a la cual la cara superior de la napa entra a la rejilla.

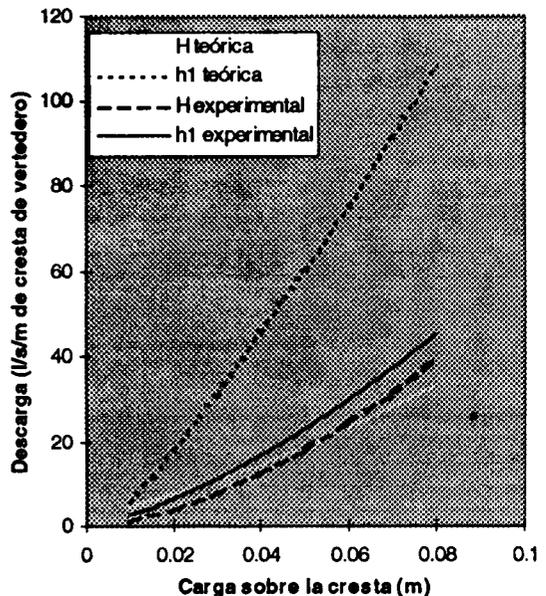
Con base en los resultados obtenidos, se evaluó la participación de distintas variables modificables durante la experimentación y se obtuvo una serie de conclusiones que podrán ser de utilidad a la hora de diseñar una estructura de captación con rejillas de barras redondas, pudiendo posiblemente hacer aproximaciones si se utilizan barras cuadradas con espesores similares.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Comparación de resultados experimentales con las expresiones teóricas existentes

Con los datos obtenidos experimentalmente se hizo la gráfica de la descarga por metro lineal de vertedero en función de las variables  $H$  (m) y  $h_1$ (m), la cual se superpuso a la gráfica homóloga del libro de Nyerges con la cual se dimensionan los vertederos de reboso y de crecida para este tipo de obras. En la gráfica (7) se muestran los resultados obtenidos y los teóricos presentados por Nyerges.

Se pudo observar que los valores de la carga  $H$  aguas arriba de la captación son muy similares a los hallados por medio de las expresiones existentes, mientras que los valores de  $h_1$  son más dispersos y mayores a los que resultan teóricamente. Esto es debido a que en la entrada del vertedero existen condiciones que afectan el flujo, como son la forma de los bordes del vertedero, la inclinación de la cresta, la rugosidad, etc. y a la posición del punto exacto donde se toma la lectura, ya que en esta zona la pendiente que alcanza la superficie de agua es muy grande por lo su altura varía rápidamente de un punto a otro.



**GRAFICA 7.** Valores experimentales y teóricos de la descarga por metro lineal de cresta, en función de las cargas  $H$  y  $h_1$ .

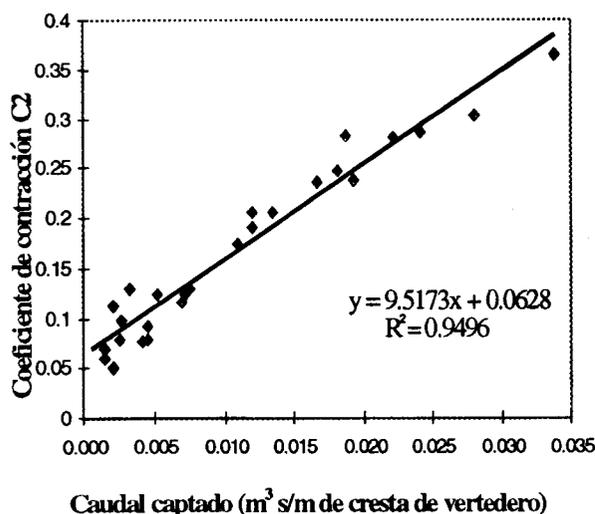
### 6.2. Análisis del aprovechamiento parcial del vertedero de reboso por parte de la rejilla de captación

En todos los casos se observó que, para una pendiente de cresta de vertedero de  $1/8$ , el porcentaje captado del caudal total estaba entre 12% y 15% por encima del porcentaje de la longitud del vertedero de reboso ocupado por la rejilla. Por ejemplo, si la rejilla tiene una longitud de 0.40 m y el vertedero de reboso mide 0.80 m, la longitud de la rejilla ocupa un 50% del vertedero de reboso y el caudal captado estará entre 62% y 65% del caudal total. Para analizar los efectos debidos a la inclinación de la cresta del vertedero, solo se analizó un caso con la pendiente de  $1/6$  (Gráfica 5), observando que el porcentaje captado estaba alrededor de un 8% por encima del porcentaje de rejilla, acercándose notablemente al porcentaje ocupado por ésta. Es importante anotar que el porcentaje captado no depende del

caudal total, simplemente es una fracción de éste.

### 6.3 Coeficiente de contracción

Con base en los valores de  $B'$  (Figura 8) en función del caudal captado, del coeficiente  $C_1$  (que representa el porcentaje de área útil de penetración), de la distancia  $S_0$  y, utilizando la Ecuación (10), se obtuvieron curvas que relacionan el coeficiente de contracción  $C_2$  con el caudal captado para cada tipo de rejilla, observándose una tendencia lineal en todos los casos. En la Gráfica 8 se muestran los valores de  $C_2$  para una rejilla de barras de  $\phi$  5/8", separadas 1.5 cm y con pendiente de 1/8.



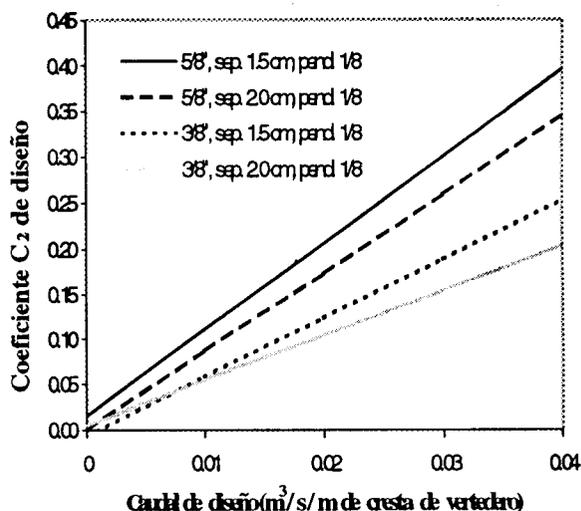
**GRÁFICA 8.** Coeficiente de contracción  $C_2$  para rejilla de barras  $\phi$  5/8", separadas 1.5 cm y con una pendiente de 1/8.

Si bien es cierto que los valores anteriores de  $C_2$  corresponden a un caso práctico específico, se observó que se ajustan de manera aceptable a una función lineal. Los valores deberán ser afectados por un factor de seguridad para poder ser usados en el diseño de obras con características similares.

Para la función de los coeficientes de contracción de diseño se utilizó una recta paralela e inferior a la resultante de la regresión lineal indicada en la Gráfica 8, de tal forma que todos los puntos experimentales estuvieran por encima de ella. La posición de la función de diseño se halló de la siguiente manera:

- Se ubicó el punto más alejado por debajo de la recta ajustada.
- Se multiplicó la distancia vertical de este punto a la recta por un factor de 1.5.
- La recta de diseño se colocó por debajo de la recta de ajuste, a una distancia vertical equivalente al valor anterior.

En la Gráfica 9 se muestran los valores de diseño propuesto para  $C_2$ :



**GRÁFICA 9.** Coeficiente de contracción  $C_2$  de diseño en función del caudal captado

En cuanto a la pendiente de la rejilla, se observó que ésta no influye de manera importante en el caudal captado; sin embargo, no se recomienda utilizar pendien-

tes menores a 1/8 ya que la capacidad "autolimpiante" se verá afectada.

Si se utiliza la malla de "pajarito" (Figura 7a), no se verá afectado el caudal a captar a pesar de que el área útil de penetración disminuye un poco. Esto es debido a que la malla produce una obstaculización sobre la lámina de agua que vierte por encima del vertedero, haciendo que el agua caiga más rápidamente a la rejilla. La utilización de este tipo de malla se deberá restringir en obras de captación que no tengan un mantenimiento periódico, ya que se obstruye muy fácilmente con hojas y demás elementos que flotan en el agua.

#### 6.4 Método de diseño propuesto

El método consiste en escoger, para un caudal de diseño determinado, las dimensiones apropiadas para la estructura de captación, utilizando las gráficas que resultan de utilizar las fórmulas tradicionales para el diseño y teniendo en cuenta los coeficientes de contracción experimentales encontrados en este estudio.

A continuación se presenta, paso a paso, la utilización de las gráficas de diseño:

1. Determinar el caudal de diseño por metro lineal de cresta de vertedero, según las necesidades de consumo y teniendo en cuenta que se deberán utilizar caudales inferiores a 40 l/s/m.
2. Leer el coeficiente de contracción  $C_2$  de diseño en la Gráfica 9, para el tipo de rejilla a utilizar, correspondiente al caudal determinado en el paso anterior.
3. Con el coeficiente de contracción  $C_2$  se podrán escoger, según la gráfica correspondiente al tipo de rejilla y para el caudal determinado, las dimensiones de B y  $S_o$  correspondientes al  $C_2$  de diseño o a

un valor inferior a éste; esto garantiza que la rejilla utilizada captará totalmente el caudal requerido. En caso de que el caudal de diseño sea un valor intermedio a los presentados, se podrá interpolar entre los resultados encontrados en las gráficas correspondientes. Para valores de  $S_o$  intermedios a los presentados en las gráficas, también se podrá interpolar.

4. En caso de no encontrarse unas dimensiones aceptables de B y  $S_o$  en la gráfica, se deberá cambiar el tipo de rejilla y repetir los pasos anteriores.
5. Opcionalmente, se puede chequear que la velocidad media  $v$  a través de las aberturas de la rejilla, sea inferior a 0.15 m/s, según el MOPT. La fórmula para velocidad media es la siguiente:

$$v = \frac{Q}{\left(\frac{e}{e+t}\right)A}$$

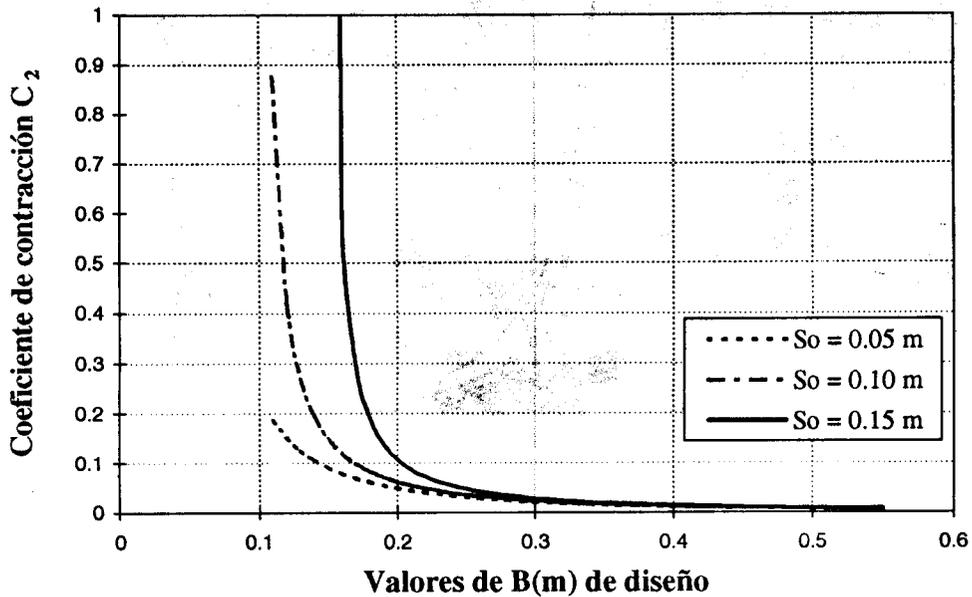
donde  $v$  es la velocidad media a través de las aberturas [m/s]; A, el área de la reja, incluyendo el espesor de las barras [m<sup>2</sup>]; Q, el caudal a través de las aberturas [m<sup>3</sup>/s]; e, el espacio libre entre barras [m], y t, el espesor de cada barra [m].

En caso de no cumplir con el requisito se deberá escoger la dimensión de B, tal que

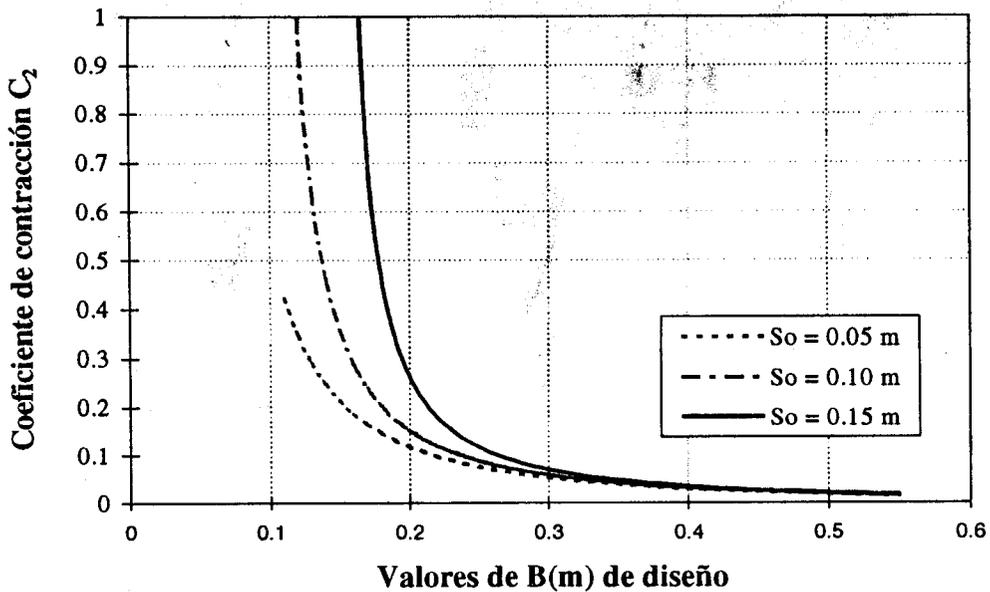
$$B \geq \frac{Q}{0.15\left(\frac{e}{e+t}\right)L} + S_o$$

Las ayudas gráficas de diseño para una rejilla construida con barras de  $\phi$  5/8", separadas 1.5 cm, para caudales de 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04 m<sup>3</sup>/s/m lineal de cresta de vertedero se presentan a continuación. Para los demás tipos de rejilla analizados, se

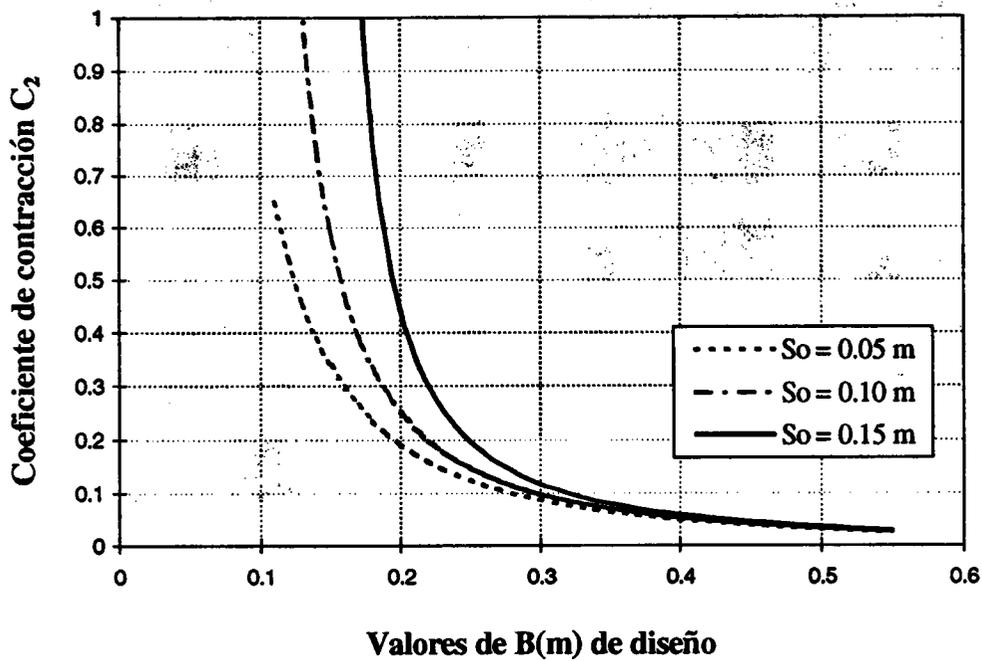
pueden consultar las ayudas gráficas de diseño en la referencia 1.



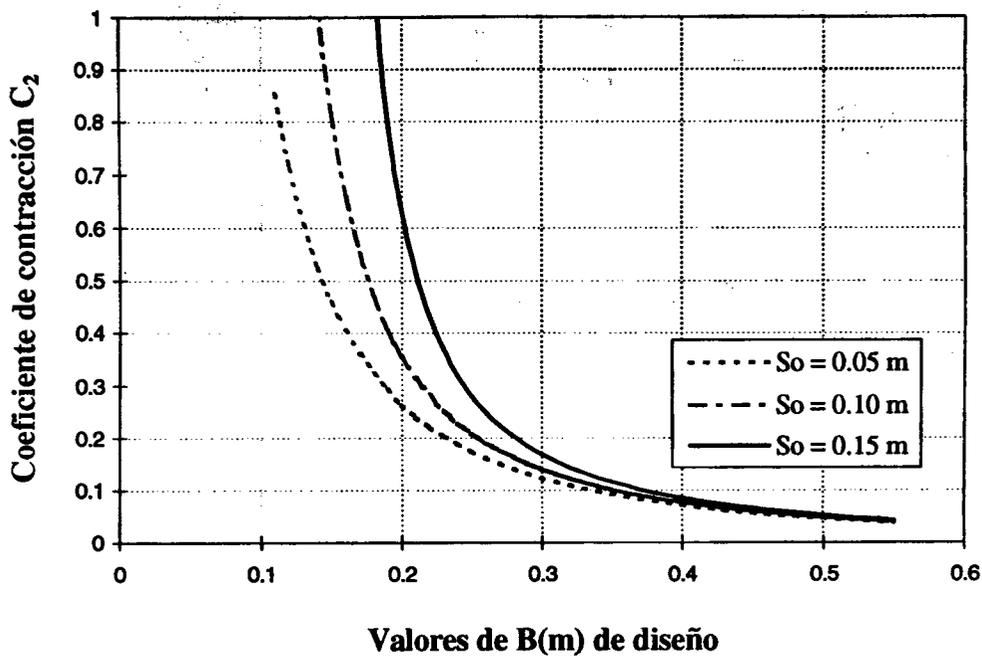
**GRÁFICA 10.** Ayuda de diseño para rejillas con barras de  $\phi 5/8''$  separadas 1.5 cm; para un caudal de  $0.01 \text{ m}^3/\text{s/m}$  lineal de cresta de vertedero.



**GRÁFICA 11.** Ayuda de diseño para rejillas con barras de  $\phi 5/8''$  separadas 1.5 cm; para un caudal de  $0.02 \text{ m}^3/\text{s/m}$  lineal de cresta de vertedero.



**GRÁFICA 12.** Ayuda de diseño para rejillas con barras de  $\phi 5/8''$  separadas 1.5 cm; para un caudal de  $0.03 \text{ m}^3/\text{s/m}$  lineal de cresta de vertedero.



**GRÁFICA 13.** Ayuda de diseño, para rejillas con barras de  $\phi 5/8''$  separadas 1.5 cm; para un caudal de  $0.04 \text{ m}^3/\text{s/m}$  lineal de cresta de vertedero.

## 7. CONCLUSIONES

En la Gráfica 7 se pudo observar que, para un mismo caudal, los valores de  $h_1$  hallados experimentalmente, son mayores que los teóricos presentados por Nyerges. Esta diferencia podría deberse a que las lecturas de los valores de  $h_1$  dependen del punto exacto donde se tomen, ya que sobre la cresta, la superficie de agua adquiere una pendiente importante, implicando que una variación pequeña en dirección horizontal en el sentido del flujo, genera variaciones apreciables en el nivel de la cara superior de la napa sobre dicha zona.

En este estudio experimental se encontró que para caudales moderados, los coeficientes de contracción  $C_2$ , propuestos por Nyerges para diferentes rejillas de barras cuadradas (Ref. 2, p. 64, Tabla 60-b), son relativamente grandes en comparación con los obtenidos para barras redondas, lo que resulta cuestionable ya que para barras redondas el coeficiente de contracción debe ser mayor.

Para caudales moderados, los tipos de rejilla utilizados ( $\phi$  5/8",  $\phi$  3/8", separadas 1.5 cm y 2.0 cm), no representaron un cambio significativo en el caudal captado, ya que restringían de manera mínima el flujo del agua a través ellas.

En los ensayos realizados para estudiar la influencia de la pendiente, se encontró que la variación de esta pendiente, de 1/8 a 1/6, no representa una diferencia notable en la descarga y dicha diferencia ni siquiera responde a una tendencia clara, lo que indica un comportamiento similar del flujo para las dos pendientes.

El uso de la malla de "pajarito" (Figura 7a), a pesar de no restringir el flujo por sí misma, sí restringe el paso de materiales, pudiendo así obstruirse con facilidad, disminuyendo la

capacidad de captar el gasto requerido. En cuanto a la utilización de la malla de "zaranda" (Figura 7b) se observó que, además de obstruirse fácilmente, restringe levemente el paso del agua hacia la rejilla.

En los casos en los que se utilizaron placas para disminuir la longitud de la rejilla, el comportamiento mostró una tendencia muy definida, pudiéndose utilizar con confianza los resultados obtenidos.

## 8. RECOMENDACIONES

Se podrá utilizar el sistema de aprovechamiento parcial del vertedero de rebose por parte de la rejilla, en los casos que sea necesario dejar pasar parte del caudal hacia aguas abajo, utilizando para el diseño, las relaciones obtenidas en este estudio.

El uso de las mallas debe ser restringido cuando la obra de captación no cuente con un servicio continuo de mantenimiento y limpieza, ya que la malla puede obstruirse de manera considerable en el transcurso de algunas horas.

Se recomiendan para el diseño, pendientes entre 1/6 y 1/8, ya que se observó durante el estudio, el buen aprovechamiento del área útil para la captación, a la vez que sirve de sistema autolimpiante.

El método de diseño propuesto da como resultado diseños económicos, por lo cual se recomienda su utilización. Queda entonces, a criterio del diseñador, la utilización de factores de seguridad, con el fin de prever problemas específicos tales como la obstrucción de la rejilla.

Debido a que en este estudio, netamente experimental, se utilizaron las expresiones teóricas existentes sin cuestionarlas hidráulicamente, se deja la inquietud, de qué tan acertadas pueden ser las fórmulas utilizadas.

Se recomienda, para futuros trabajos de grado, realizar un estudio y reformulación de dichas expresiones analíticas, considerando que en la actualidad se cuenta con herramientas poderosas de análisis que pueden facilitar dicho trabajo.

Teniendo en cuenta la subpresión que puede producirse en el borde superior de la cresta donde la napa se desprende del vertedero, se recomienda proteger dicha zona con un material resistente a la erosión para evitar el deterioro del hormigón que, a largo plazo, cambiaría las características iniciales para las cuales fue diseñado.

## REFERENCIAS

1. **BOTERO, M., CANO, A.** "Estudio experimental de rejilla en bocatoma de fondo". Trabajo de Grado. Universidad Nacional Sede Medellín, 1997. 122 p.
2. **NYERGES V., Nicolás.** Obras de captación en cursos superficiales de agua para gastos moderados. [s.l:s.n], 1962. 130 p.
3. **CHOW, Ven Te.** Hidráulica de los canales abiertos. México: Editorial Diana, 1982. 633 p.
4. **PÉREZ P., Jorge A.** Acueductos y Alcantarillados. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Primera edición, 1995. 266 p.
5. **AZEVEDO NETTO, J.M., ACOSTA ÁLVAREZ, G.** Manual de hidráulica. Mexico: Harla, 1976. 578 p.
6. **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y DE TRANSPORTE.** Colombia. Normas para el diseño de acueductos rurales y urbanos menores. [s.l: s.n], 1990. 74 p.