

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Delimitación del uso de compuertas como estructuras de aforo en canales de riego.
<i>Autor / Adscripción</i>	Benjamín de León Mojarro Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  Jorge Víctor Prado Hernández Luis Rendón Pimentel Comisión Nacional del Agua, México  Braulio Robles Rubio Javier Ramírez Luna Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 21(1): 95-103
<i>Fecha de publicación</i>	2006
<i>Resumen</i>	En los canales de los distritos de riego, el control de los caudales y los tirantes, así como la medición del agua, son fundamentales para ordenar la distribución y la entrega volumétrica a las áreas de riego. Los caudales y tirantes en los canales se controlan normalmente mediante compuertas y vertedores. Debido a la importancia de las compuertas en la operación de los canales, se realizó un análisis sobre la precisión y la confiabilidad de la medición del agua en compuertas funcionando a descarga libre y ahogada.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/844">http://hdl.handle.net/123456789/844</a>

# Delimitación del uso de compuertas como estructuras de aforo en canales de riego

Benjamín de León-Mojarro

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Jorge Víctor Prado-Hernández  
Luis Rendón-Pimentel

Comisión Nacional del Agua, México

Braulio Robles-Rubio  
Javier Ramírez-Luna

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*En los canales de los distritos de riego, el control de los caudales y los tirantes, así como la medición del agua, son fundamentales para ordenar la distribución y la entrega volumétrica a las áreas de riego. Los caudales y tirantes en los canales se controlan normalmente mediante compuertas y vertedores. Aunque la función de estas estructuras no es de medición, se deben establecer relaciones experimentales para estimar el caudal a partir de los tirantes y de la abertura de las compuertas o de la altura de la cresta de los vertedores. Debido a la importancia de las compuertas en la operación de los canales, se realizó un análisis sobre la precisión y la confiabilidad de la medición del agua en compuertas funcionando a descarga libre y ahogada. A partir de simplificaciones en las ecuaciones de flujo transitorio de Saint-Venant en la vecindad de las compuertas, se establecieron funciones que relacionan la variación del caudal y del tirante inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la estructura, así como de los tirantes y de la abertura para valores del flujo crítico y supercrítico aguas abajo de la compuerta. Estas funciones se probaron para diferentes rangos de precisión y confiabilidad en la estimación del caudal a través de las compuertas. Las diferencias existentes entre los caudales experimentales y los estimados con el modelo de calibración de las estructuras confirman que las compuertas pueden servir como estructuras de aforo siempre que se verifiquen las relaciones funcionales definidas.*

**Palabras clave:** calibración de compuertas, estructuras de aforo, estructuras de control.

## Introducción

En los distritos de riego de México se han usado las compuertas planas deslizantes y radiales para regular el tirante aguas arriba de las estructuras a fin de abastecer adecuadamente las tomas laterales y controlar el caudal a través de ellas. El uso de estas estructuras para regular el caudal y el tirante requiere conocer la precisión de la medida del caudal, ya que como señalan Ruiz *et al.* (1995), González *et al.* (1999), Brenes *et al.* (2000) y Prado *et al.* (2003), en la ejecución de maniobras de compuertas se debe verificar que el punto de funciona-

miento de dichas estructuras se encuentre fuera de las zonas de saturación, es decir, que exista la carga hidráulica suficiente para obtener una buena precisión en la medida del caudal.

En compuertas a descarga libre es frecuente encontrar modelos adecuados para la estimación del caudal e incluso después de cierta condición hidráulica es posible suponer un coeficiente de descarga constante obteniendo resultados aceptables (Lencastre, 1961). En compuertas a descarga ahogada la situación es más compleja, ya que el coeficiente de descarga de la ecuación del orificio varía en función del grado del

ahogamiento (Swamee, 1992; Montes, 1997; Speerli y Hager, 1999; Chávez y García, 2001; Lin et al., 2002; Arteaga et al., 2003; Peña et al., 2003; Spaan et al., 2003). Por lo anterior, es importante indicar las condiciones bajo las cuales las compuertas funcionan adecuadamente para que puedan utilizarse como estructuras de control y aforo simultáneamente.

Del análisis y simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant en la vecindad de las estructuras de control, se plantea la posibilidad de delimitar el uso de las compuertas como estructuras de control y aforo, usando como parámetro indicativo de la precisión, la comparación del tirante aguas arriba de la compuerta ( $Z_1$ ) con respecto a la suma del tirante aguas abajo ( $Z_2$ ) más un medio de la abertura de la compuerta ( $a$ ). Para verificar esta hipótesis se hicieron varias pruebas de aforo para calibrar una compuerta plana (laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) y una radial (laboratorio de hidráulica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo). Se consideraron varias aberturas de compuertas y un amplio rango de tirantes, con la finalidad de verificar las condiciones de operación de las compuertas con valores  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  y valores  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ , con los cuales se cubre el régimen subcrítico y supercrítico aguas abajo de la compuerta.

## Desarrollo del tema

### Representación matemática del flujo en canales abiertos

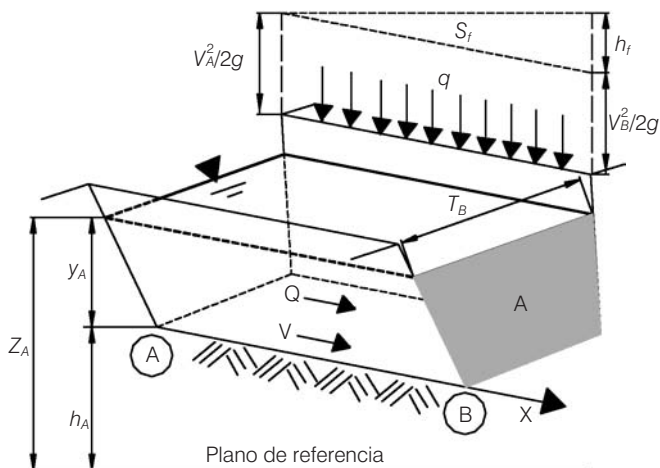
La dinámica de los sistemas hidráulicos a superficie libre como los canales de riego se representa adecuadamente por las ecuaciones de flujo transitorio de Saint-Venant (Pochat, 1983; Cunge, 1983; De León, 1990):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Qv)}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gAS_f + Kqv \quad (2)$$

donde  $Q$  es el caudal o gasto [ $L^3 T^{-1}$ ];  $x$  es la distancia horizontal [ $L$ ];  $T$  es el ancho del espejo libre del agua [ $L$ ];  $Z$  es la cota de la superficie libre del agua [ $L$ ];  $t$  es el tiempo [ $T$ ];  $q$  es el caudal lateral unitario (aporte o extracción) [ $L^2 T^{-1}$ ];  $v$  es la velocidad media del flujo [ $LT^{-1}$ ];  $A$  es el área hidráulica [ $L^2$ ];  $g$  es la aceleración gravitacional [ $LT^{-2}$ ];  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía [ $LL^{-1}$ ] y  $K$  es un coeficiente [adim.] que toma el valor de cero si  $q > 0$  y uno si  $q < 0$  (ilustración 1).

Ilustración 1. Variables del modelo de Saint-Venant.



### Representación del flujo en las estructuras

Si en las ecuaciones (1) y (2) se considera que el caudal consecutivo a una maniobra es constante ( $Q = \text{constante}$ ), que el caudal lateral unitario es nulo ( $q = 0$ ) y que las pérdidas de carga por fricción son despreciables ( $S_f = 0$ ), entonces las variables independientes ( $x$ ) y ( $t$ ) se pueden eliminar, ya que las estructuras se localizan en puntos conocidos y las maniobras se ejecutan en tiempos predeterminados. Con estas consideraciones, el flujo en la vecindad de las estructuras se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{T} \left( \frac{dQ}{dZ} \right)^2 - \frac{2Q}{A} \left( \frac{dQ}{dZ} \right) + \frac{Q^2 T}{A^2} - gA = 0 \quad (3)$$

Las soluciones de la ecuación (3) son las ecuaciones (4) y (5):

$$\frac{dQ}{dZ} = (v \pm c) T \quad (4)$$

$$\left( \frac{Q^2}{A^2} \right) T - gA = 0 \quad (5)$$

donde  $c$  es la celeridad de las ondas producidas por la maniobra de la estructura [ $LT^{-1}$ ].

La ecuación (4) define la relación entre el caudal y el tirante inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la compuerta después de una maniobra, a saber:

$$\text{Aguas arriba: } \frac{dQ}{dZ} = (v - c) T \quad (6)$$

Aguas abajo: 
$$\frac{dQ}{dZ} = (v + c)T \quad (7)$$

De la ecuación (5) se obtiene la relación básica para el flujo en régimen crítico en un canal de cualquier tipo de sección transversal (*Bureau of Reclamation, 1997*). Según la ilustración 2 (corte A-A), de la ecuación (5) se establece la relación entre los tirantes aguas arriba  $Z_1$  y aguas abajo  $Z_2$  y las características geométricas de la compuerta (A) en ausencia de maniobra mediante la siguiente ecuación:

$$2g(Z_1 - Z_2) = gA/T \quad (8)$$

Si el orificio de la compuerta es de sección rectangular de altura ( $a$ ), entonces el área hidráulica  $A = (a)T$  debido a que el ancho del orificio ( $b$ ) en la vecindad de la estructura es igual a  $T$  (ilustración 2, corte B-B). Se obtiene entonces una relación de la siguiente forma:

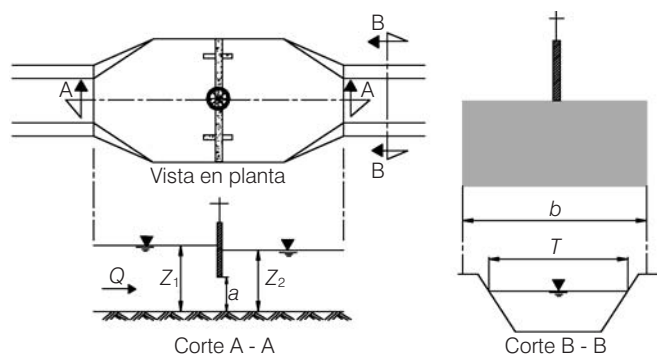
$$Z_1 = Z_2 + (a/2) \quad (9)$$

Con base en la ecuación (9) se plantea como hipótesis que una compuerta sirve como estructura de control y de aforo siempre que se cumpla la siguiente relación:

$$Z_1 > Z_2 + \frac{a}{2} \quad (10)$$

Con esta relación se establece que el flujo aguas abajo de la compuerta debe ser supercrítico para tener precisión en el aforo. Para probar esta hipótesis se realizaron mediciones de laboratorio en compuertas planas deslizantes y radiales. El análisis consistió en la calibración de las compuertas en descarga ahogada, considerando puntos que cumplieran las condiciones

**Ilustración 2. Representación de la estructura.**



$Z_1 > (Z_2 + a/2)$  y  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  para comparar los caudales medidos contra los estimados. Los caudales estimados se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$Q = C_d b a \sqrt{2g(Z_1 - Z_2)} \quad (11)$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga [adim.];  $b$  y  $a$  son el ancho y abertura de la compuerta [L], respectivamente.

El coeficiente de descarga  $C_d$  se obtuvo mediante relaciones funcionales entre el caudal ( $Q$ ) que pasa por la compuerta –medido con un vertedor situado al inicio del canal experimental–, la abertura ( $a$ ) y los tirantes aguas arriba ( $Z_1$ ) y aguas abajo ( $Z_2$ ) de la compuerta en descarga ahogada. Los tirantes se midieron a un metro de distancia de la estructura.

#### Definición del régimen de funcionamiento hidráulico de las compuertas

Para definir el régimen de descarga de las compuertas se usaron los criterios de Cunge y Woolhiser (1975), los cuales establecen que:

Si  $Z_2 \leq (2/3)Z_1$  y si  $a \leq (2/3)Z_1$ , entonces la estructura funciona como compuerta a descarga libre. Pero si  $a > (2/3)Z_1$ , entonces la estructura funciona como vertedor a descarga libre.

Si  $Z_2 > (2/3)Z_1$  y si  $a \leq Z_2$ , entonces la estructura funciona como compuerta a descarga ahogada. Pero si  $a > Z_2$ , entonces la estructura funciona como vertedor a descarga ahogada.

#### Canal largo del laboratorio de hidráulica del IMTA

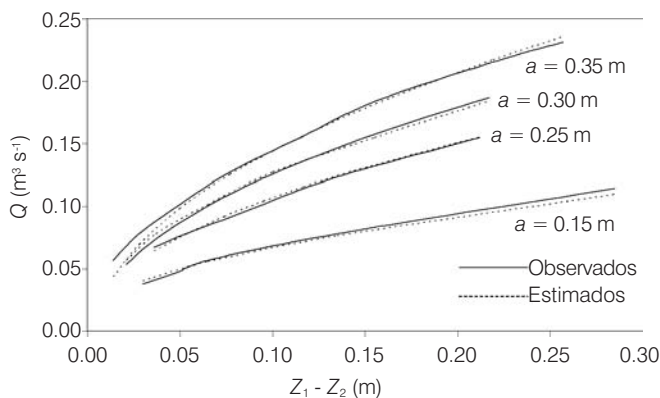
En este canal se estudió una compuerta plana deslizante vertical rectangular de 0.4 m de ancho. El caudal ( $Q$ ) a través de la compuerta fue medido con un vertedor rectangular con contracciones laterales, colocado al inicio del canal. La sección del canal es rectangular de 0.6 m de ancho, con pendiente de la rasante despreciable y con una compuerta abatible al final para manejar diferentes condiciones de ahogamiento.

Se consideraron cuatro aberturas de compuerta ( $a$ ) a saber: 0.15, 0.25, 0.30 y 0.35 m (ilustración 3). Para cada abertura se incrementaron los caudales gradualmente desde 0.0378 hasta 0.2313  $m^3 s^{-1}$ .

#### Canal del laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma Chapingo

El análisis se realizó en una compuerta radial de ancho ( $b$ ) = 0.6 m y radio ( $r$ ) = 0.9 m. Se manejaron dos alturas

**Ilustración 3. Caudales observados y estimados en la compuerta plana.**



de perno ( $p$ ) de 0.65 m y 0.80 m con dos aberturas de compuerta ( $a$ ) de 0.1 y 0.2 m.

La sección del canal es rectangular con 0.6 m de ancho por 1.0 m de altura y su pendiente longitudinal es de  $0.0005 \text{ m m}^{-1}$ . Para propiciar diferentes condiciones de ahogamiento, se usó una compuerta deslizante al final del canal y el caudal se midió con un vertedor rectangular sin contracciones laterales, situado a la entrada del canal.

Para cada abertura se varió el caudal entre  $0.0291$  y  $0.1471 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

## Resultados y análisis

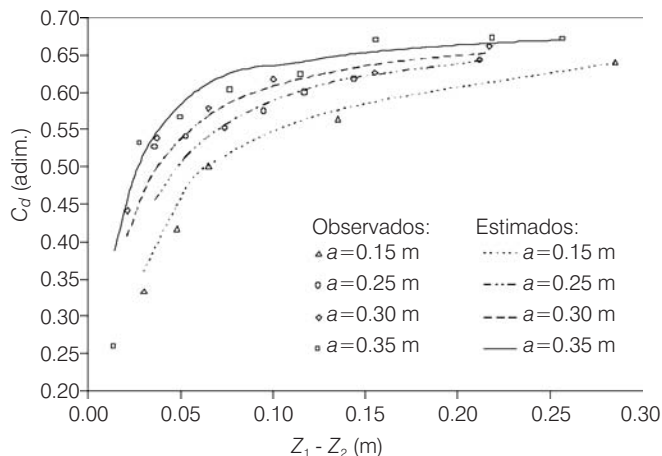
### Compuerta plana vertical deslizante

Con los datos experimentales obtenidos a descarga ahogada y usando los criterios de discriminación de Cunge y Woolhiser (1975), el coeficiente de descarga  $C_d$  de la ecuación del orificio se ajustó con un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.998$ ) al siguiente modelo hiperbólico:

$$C_d = \frac{Z_1 - Z_2}{-0.0126 + 1.3159 Z_1 - 1.3197 Z_2 + 0.0558 a} \quad (12)$$

La ilustración 4 muestra que existe mayor error en la estimación del coeficiente de descarga cuando la carga en la compuerta es menor. Esto influye directamente en la precisión de la estimación del caudal como se puede ver en la ilustración 3, donde al inicio de las curvas correspondientes a las aberturas grandes (0.30 y 0.35 m), donde el agua tiene menos energía, hay diferencias significativas entre los caudales observados y los estimados a pesar de la alta correlación.

**Ilustración 4. Tendencia de los coeficientes de descarga en la compuerta plana.**

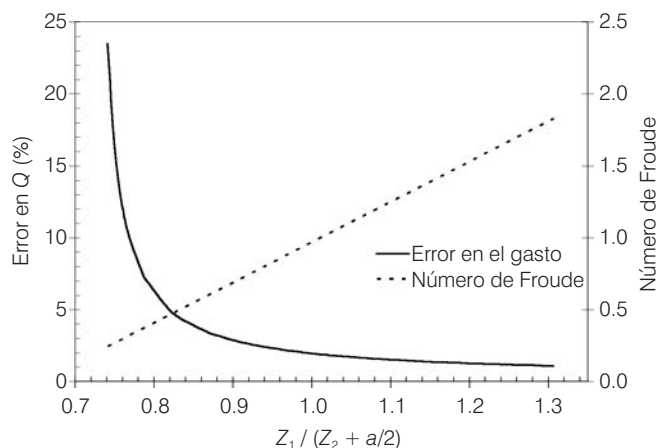


Los errores menores en la estimación del caudal corresponden a los puntos  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ , pero se incrementan a medida que la desigualdad disminuye hasta obtener los errores más altos conforme la desigualdad  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  se hace mayor (ilustración 5). Esto se debe a que en el caso de  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  existe mayor energía del flujo aguas abajo de la compuerta (número de Froude  $> 1$ ) que en la condición  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  (número de Froude  $< 1$ ).

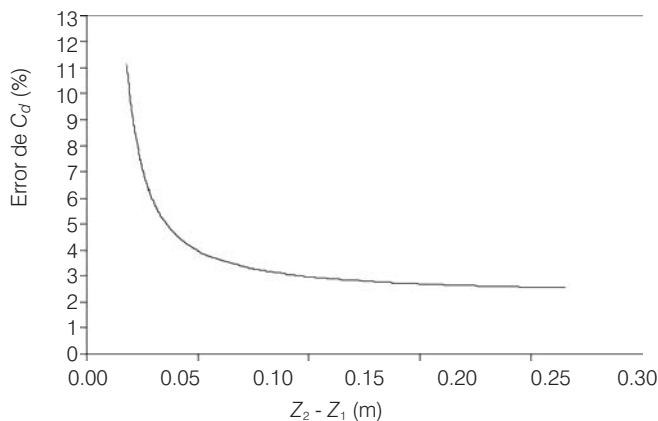
### Compuerta radial

Con los datos experimentales a descarga ahogada de la compuerta radial y usando los criterios de discriminación de Cunge y Woolhiser (1975), se obtuvo un modelo del

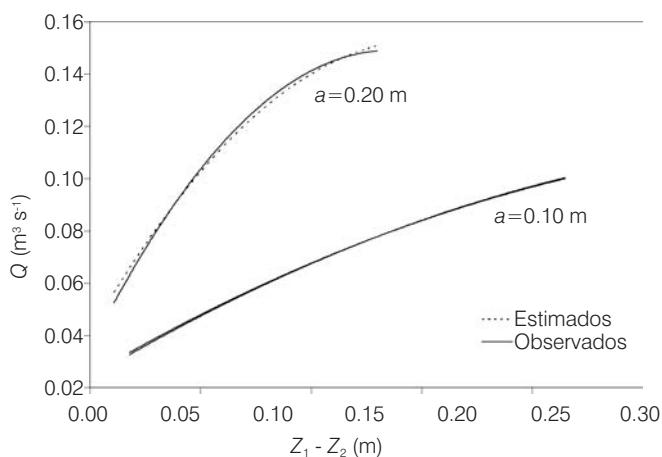
**Ilustración 5. Tendencia del error absoluto en la estimación del caudal y número de Froude en la compuerta plana.**



**Ilustración 6. Tendencia del error absoluto en la estimación del  $C_d$  en la compuerta radial para  $p = 0.65$  y  $a = 0.10$  m.**



**Ilustración 7. Caudales observados y estimados en la compuerta radial para  $p = 0.65$ .**



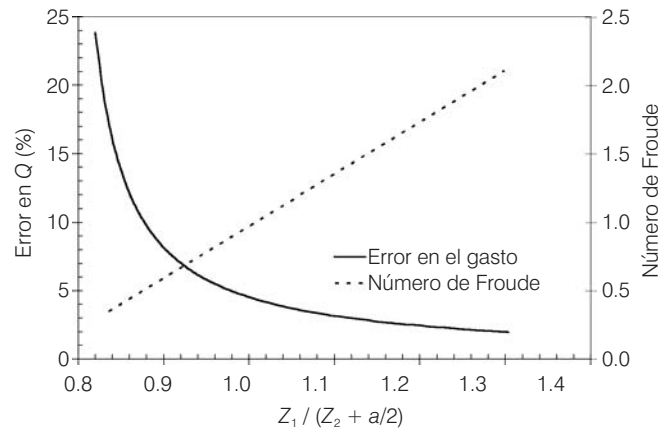
coeficiente de descarga similar a los obtenidos por Palacios (1981) y Tovar *et al.* (2003), con un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.994$ ):

$$C_d = \frac{Z_1 - Z_2}{r} \cdot \frac{1}{0.0995 + 1.8416 \frac{Z_1}{r} - 1.7294 \frac{Z_2}{r} + 0.1680 \frac{a}{r} + 0.0619 \frac{p}{r}} \quad (13)$$

El comportamiento del coeficiente de descarga y del error en la estimación del caudal es similar al de la compuerta plana (ilustraciones 6, 7 y 8).

Para ambas compuertas, el error absoluto del caudal estimado cuando se tiene la condición  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  supera hasta cinco veces a la condición  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ . Sin embargo, para algunos valores en los límites

**Ilustración 8. Tendencia del error absoluto en la estimación del caudal y número de Froude en la compuerta radial.**



$Z_1 = (Z_2 + a/2)$  es posible encontrar puntos con precisiones aceptables. Lo anterior muestra que se pueden tener diferentes grados de precisión y confiabilidad en la estimación del caudal.

*Precisión y confiabilidad en la estimación del caudal*

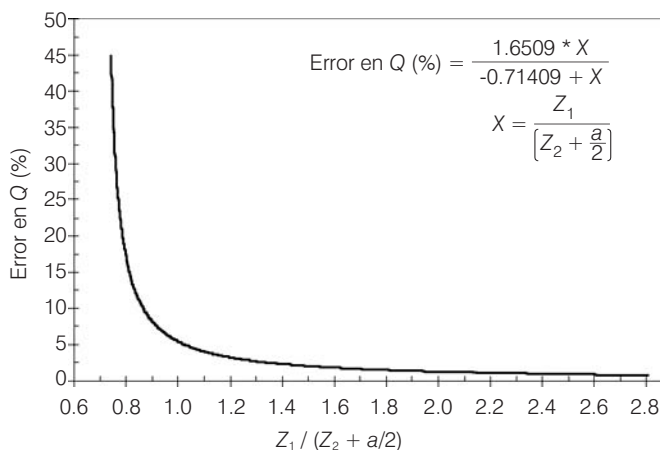
En general, cuando se habla de compuertas a descarga ahogada no se señala el criterio de discriminación (Sotelo, 1989; Montes, 1997; Chávez y García, 2001; Peña *et al.*, 2003). Algunos autores dan por hecho la descarga ahogada cuando el  $Z_2$  repercute en un pequeño incremento ( $\Delta Z_1$ ) en  $Z_1$ . Así, Lin *et al.* (2002) señalan un  $\Delta Z_1$  del 3.0% de variación en el tirante aguas arriba, mientras que Spaan *et al.* (2003) mencionan que  $\Delta Z_1$  puede representar sólo milímetros. Estos criterios no coinciden con los de Cunge y Woolhiser (1975), ya que pruebas realizadas en este trabajo y datos tomados de Spaan *et al.* (2003) indican que  $\Delta Z_1$  debe ser mucho mayor del 3.0% de variación del tirante aguas arriba.

Los criterios de discriminación de Cunge y Woolhiser (1975) para delimitar los rangos de funcionamiento de la compuerta permiten reducir el margen de error en la estimación del caudal (ilustraciones 9 y 10). En estas ilustraciones se observa que el error puede ser del orden del 45%, mientras que en las ilustraciones (5) y (8) es del orden del 24 por ciento.

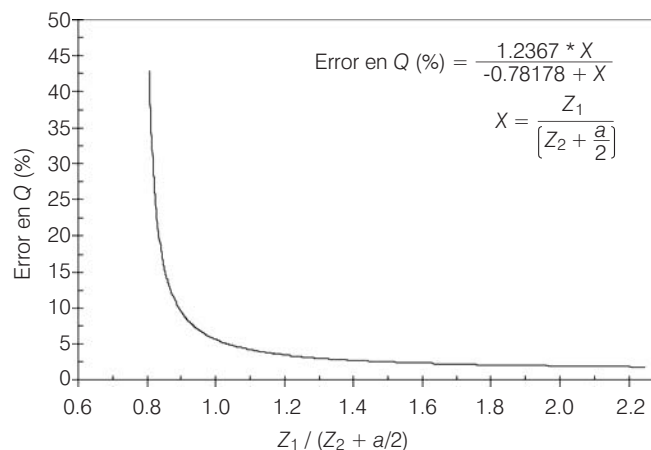
De pruebas realizadas en este trabajo, se encontró que a descarga libre siempre se cumple la relación  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  y se confirmó que se puede estimar el caudal con alta confiabilidad cuando se cumple la relación  $Z_1/a > 1.50$  (sugerida por Cunge y Woolhiser, (1975) y es muy similar a la relación  $Z_1/a > 1.35$ , sugerida por



**Ilustración 9. Tendencia del error absoluto en la estimación del caudal en la compuerta plana, sin considerar los criterios de discriminación de Cunge y Woolhiser (1975).**



**Ilustración 10. Tendencia del error absoluto en la estimación del caudal en la compuerta radial, sin considerar los criterios de discriminación de Cunge y Woolhiser (1975).**



Sotelo (1989)). Asimismo, se encontró que la precisión aumenta conforme  $Z_1$  aumenta, como lo reportan Gentilini (1947), Henry (1950), Garbrecht (1997), Cozzo (1978), Nago (1978), Noutsopoulos y Fanariotis (1978), Swamee (1992), Montes (1997), Speerli y Hager (1999) y Peña *et al.* (2003).

A descarga ahogada se cumple la condición  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  para  $(Z_1 - Z_2)/a > 0.5$  y coincide con los resultados de Peña *et al.* (2003) en los que a partir de estos valores, la precisión de la estimación del error se incrementa. La condición  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  se cumple cuando  $Z_1/a > 2.7$  para descarga ahogada, por lo que se puede generalizar que se estima con precisión el caudal en una compuerta cuando  $Z_1/a > 1.5$ , ya que la compuerta trabaja como un orificio (Sotelo, 1989) y el flujo bajo la compuerta tiene suficiente energía para facilitar el paso del agua.

Se observó que no definir adecuadamente los límites del régimen de funcionamiento hidráulico de las compuertas, así como cometer errores en la modelación y medición, aumenta los errores en la estimación del caudal. Si se cuenta con modelos precisos, los errores de medición pueden ocasionar por sí solos incertidumbre en la estimación del caudal (Chávez y García, 2001).

Después de realizar una modificación en la abertura de la compuerta, abriéndola o cerrándola ( $a$ ), el tirante aguas arriba ( $Z_1$ ) oscila mucho menos que el de aguas abajo ( $Z_2$ ), por lo que los errores de medición del  $Z_1$  y la abertura ( $a$ ) podrían considerarse despreciables con respecto a los errores en la obtención de  $Z_2$ .

Tomando en cuenta que el error en la medición del caudal en las compuertas depende de la precisión de la medida de los tirantes y del grado de ahogamiento de

las mismas, se consideraron cuatro posibles escenarios en la estimación del caudal en términos de precisión y confiabilidad (ilustración 11): 1) la relación de tirantes  $Z_1/(Z_2 + a/2)$  que se encuentren entre 1.00 y 1.05, aparentemente es confiable porque cumple con la condición  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ , pero puede ser poco precisa, ya que los valores de la relación de tirantes  $Z_1/(Z_2 + a/2)$  se encuentran próximos al régimen crítico aguas abajo de la compuerta; 2) la relación de tirantes  $Z_1/(Z_2 + a/2)$  que se encuentren entre 0.95 y 1.00 puede ser poco confiable debido a que  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$  y sin embargo, puede tener una buena precisión; 3) la relación de tirantes cuyos valores verifiquen la condición  $Z_1/(Z_2 + a/2) \geq 1.05$  sería confiable y precisa, ya que  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ ; 4) la rela-

**Ilustración 11. Precisión y confiabilidad en la estimación del caudal, en función de los errores de medición de los tirantes  $Z_1$  y  $Z_2$ , y el grado de ahogamiento de la compuerta.**

	(+)	
	Tirantes $Z_1 < (Z_2 + a/2)$ : $Z_1/(Z_2 + a/2)$ entre 0.95 -1.0	Tirantes $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ : $Z_1/(Z_2 + a/2) \geq 1.05$
Precisión	(-)	(+)
	Tirantes $Z_1 < (Z_2 + a/2)$ : $Z_1/(Z_2 + a/2) \leq 0.95$	Tirantes $Z_1 > (Z_2 + a/2)$ : $Z_1/(Z_2 + a/2)$ entre 1.0 - 1.05
	(-)	
		Confiabilidad

**Cuadro 1. Datos de operación de una compuerta radial de la represa km 135 + 840 del canal principal MD del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua, ciclo primavera-verano 2004-2005.**

$Z_1$ (m)	$Z_2$ (m)	$a$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Z_1/(Z_2 + a/2)$	Número de Froude abajo de la compuerta
3.45	2.35	0.20	2.33	1.41	3.32
3.30	2.30	0.15	1.74	1.39	3.65
3.28	2.28	0.19	1.51	1.38	3.24
3.17	2.12	0.16	1.37	1.44	3.62
3.32	2.23	0.18	1.48	1.43	3.48

ción de tirantes cuyos valores verifiquen la relación  $Z_1/(Z_2 + a/2) \leq 0.95$  no sería confiable ni precisa, ya que  $Z_1 < (Z_2 + a/2)$ .

*Verificación de los resultados en una compuerta operada en un canal de riego*

Con la finalidad de verificar los resultados obtenidos en laboratorio, se analizaron los datos de operación y de aforo de una compuerta radial de un canal de riego, ubicada en el km 135+840 del canal principal, margen derecha del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua (Cuadro 1). Según los criterios de Cunge y Woolhiser (1975), esta compuerta funciona a descarga ahogada y cumple con la hipótesis planteada en la investigación, ya que el número de Froude es mayor a uno,  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  y la relación de tirantes  $Z_1/(Z_2 + a/2) \geq 1.05$ , con lo cual el funcionamiento hidráulico de esta compuerta la sitúa en el primer cuadrante de la ilustración 11. Esto permite asegurar que la medición del caudal en esta compuerta tiene una buena precisión y confiabilidad.

### Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos se logró confirmar la hipótesis de la investigación y definir los límites de precisión y confiabilidad para utilizar las compuertas de control como estructuras de aforo.

En compuertas a descarga libre siempre se cumple la condición  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  y se verificó que es posible estimar el caudal con buena precisión y confiabilidad cuando se cumple la relación  $Z_1/a > 1.5$ . Las ecuaciones para determinar los coeficientes de descarga (12 y 13) son particulares de cada compuerta y son precisas para estimar los caudales a través de las compuertas, siempre que se cumplan las condiciones  $Z_1 > (Z_2 + a/2)$  y  $Z_1/(Z_2 + a/2) \geq 1.05$ .

El criterio para estimar la precisión y la confiabilidad de la medida del caudal en compuertas es muy sencillo y no requiere medidas especiales ni cálculos elaborados. Los responsables de la operación pueden hacer

esta estimación y juzgar sobre su validez con las mediciones cotidianas que realizan durante la operación normal de las estructuras.

Recibido: 25/08/2005  
Aprobado: 01/10/2005

### Referencias

- ARTEAGA, R., REYES, A., SÁNCHEZ, A. M. y TOLEDO, J. A. *Experimentación de las condiciones de funcionamiento de compuertas radiales bajo descarga ahogada*. Zacatecas, México: XII Congreso Nacional de Irrigación, 2003, pp. 185-194.
- BRENES, A., DE LEÓN, B., RUIZ, V. y RENDÓN, L. Sistema de control adaptable para la regulación de canales de riego. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 1, 2000, pp. 63-72.
- BUREAU OF RECLAMATION. *Water measurement manual*. Tercera edición. Water Resources Technical Publication, U.S. Department of the Interior. 1997, pp. 1-29.
- CHÁVEZ, A. y GARCÍA, N. *Uso de las compuertas de regulación como estructuras de aforo en canales de riego*. Guanajuato, México: XI Congreso Nacional de Irrigación, 2001, pp. 147-152.
- COZZO, G. Una formula per il calcolo del coefficiente d'effluo delle luci sotto paratoie. *L'Energia Elettrica*. Núm 55, 1978, pp. 504-513.
- CUNGE, J.A. y WOOLHISER, D. *Irrigation systems*. K. Mahmood and V. Yevjevich, eds. Fort Collins, Colorado, Estados Unidos de América: Water Resources Publication, 1975, pp. 509-537.
- CUNGE, J.A. *Simulation des écoulements non permanents dans les rivières et canaux*. Grenoble, Francia: Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, 1983.
- DE LEÓN, B. Modelación matemática de la maniobra de estructuras en una red de canales de riego. *Agrociencia serie Agua-Suelo-Planta-Atmósfera*. Vol. 1, núm 4, 1990, pp. 101-109.
- GARBRECHT, G. Discussion of discharge computation at river control structures, por Dannie L. Collins. *J. Hydr. Div., ASCE*. Vol. 104, núm. 12, 1997, pp. 1481-1484.



- GENTILINI, B. Ecoulement sous les vanes de fon inclinées ou a secteur. *La Hoville Blanche*. Marzo-abril de 1947, pp. 145-149.
- GONZÁLEZ, J., DE LEÓN, B., RUIZ, V. y RENDÓN, L. Sistema de regulación de canales en el distrito de riego de La Be-goña, Gto. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIV, núm. 2, 1999, pp. 11-20.
- HENRY, R. H. Discussion of diffusion of submerged jets por M.L. Albertson, B. Dai; R. A. Jensen, y H. Rouse. *Transactions, American Society of Engineers*. Núm. 115, 1950, pp. 687-694.
- LENCASTRE, A. *Manuel d'Hydraulique Générale Tome II*. Eyrolles, París, France. 1961, pp. 206-411.
- LIN, C.H., YEN, J. and TSAL, C. Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition. *J. Irrig. and Drain. Engr., ASCE*. Vol. 128, núm 4, 2002, pp. 249-252.
- MONTES, J.S. Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates. *J. Hydr. Engr., ASCE*. Vol. 123, núm. 3, 1997, pp. 219-232.
- NAGO, H. Influence of gate-shapes on discharge coefficients. *Trans. Japanese Soc. of Civ. Engr.* Vol. 10, 1978, pp. 116-119.
- NOUSOPOULOS, G. K. y FANARIOTIS, S. Discussion of free flow immediately below sluice gates by Nallamuthu Rajaratnam. *J. Hydr. Div., ASCE*. Vol. 124, núm. 3, 1978, pp. 451-454.
- PALACIOS S., L. A. *Determinación de modelos matemáticos empíricos del coeficiente de gasto en compuertas radiales*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Depto. de Irrigación. 1981. México. 36 p.
- PEÑA, E., MONTIEL, M. y GONZÁLEZ, J. *La calibración de compuertas planas para medir el caudal y la operación de los canales de riego*. Zacatecas, México: XII Congreso Nacional de Irrigación, 2003, pp. 179-184.
- POCHAT, R. *Ecoulement a surface libre*. Montpellier, Francia: Ecole Nationale du Genie Rurale de Eaux et des Forets. 1983.
- PRADO, J., DE LEÓN, B., RUIZ, V., EXEBIO, A. y MEJÍA, S. Evaluación experimental de algoritmos de control de canales de riego. *Agrociencia*. Vol. 37, núm. 4, 2003, pp. 419-428.
- RUIZ, V., SCHUURMANS, J. y RODELLAR, J. Properties and characteristics of canal control algorithms. *Proc. of the Water Resources Engineering Conference, ASCE*. San Antonio, Texas, Estados Unidos de América, 1995, pp. 11-15.
- SOTELO, G. *Hidráulica general*. México, D.F.: LIMUSA, 1989, pp. 203-272.
- SPAAN, B., VAN NOOYEN, R., DE GRAS, J. y BROUWER, R. Discharge formulas of Crump-De Gruyter gate-weir for computer simulation. *J. Irrig. and Drain. Engr. ASCE*. Vol. 129, núm. 4, 2003, pp. 270-277.
- SPEERLI, J. y HAGER, W. Discussion of irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates by Montes, J.S., *J. Hydr. Engr., ASCE*. Vol. 125, núm. 2, 1999, pp. 208-210.
- SWAMEE, P. K. Sluice-gate discharge equations. *J. Irrig. and Drain. Engr., ASCE*. Vol. 118, núm. 1, 1992, pp. 56-60.

### Abstract

DE LEÓN-MOJARRO, B., PRADO-HERNÁNDEZ, J., RENDÓN-PIMENTEL, L., ROBLES-RUBIO, B. & RAMÍREZ-LUNA, J. Floodgates use delimitation as spillway structures in irrigation channels. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 1, January-March, 2006, pp. 95-103.

The control of flow, water level as well as water measuring in the channels of the irrigation districts are fundamental to put order in distribution and volume delivery in irrigation areas. The flows and water level in the channels are usually controlled with floodgates and spillways. Although the function of these structures is not of measuring, experimental relations have to be established to estimate the flow as from water level and the opening of the floodgates or the height of the spillways' crest. Due to the floodgates importance in the channels operation, an analysis was carried out about precision and reliability on water measuring in floodgates operating at free and drowned discharge. As from the simplifications of Saint-Venant's transitory flux equations in the vicinity of the floodgates, functions were established to relate the variations of the flow and water level immediately up stream and down stream of the structure. As well as the water level and the opening for critic and super-critic flow values down stream of the flood gate. These functions were tested for different precision and reliability ranges in estimating the flow through the floodgates. The existing differences between experimental flows and the ones estimated through the calibration model of the structures, confirm that the floodgates can work as spillway structures as long as the defined functional relations are verified.

**Keywords:** floodgates calibration, spillway structures, control structures.

### Dirección institucional de los autores:

*Benjamín de León-Mojarro*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Paseo Cuauhnáhuac 8532,  
Progreso, Jiutepec, Morelos, México,  
C.P. 62550,  
teléfono: + (52) (777) 329 3600,  
bleon@tlaloc.imta.mx

*Jorge Víctor Prado-Hernández*  
*Luis Rendón-Pimentel*

Comisión Nacional del Agua  
joviph@colpos.mx  
maria.ortiz@cna.gob.mx

*Braulio Robles-Rubio*  
*Javier Ramírez-Luna*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Paseo Cuauhnáhuac 8532,  
Progreso, Jiutepec, Morelos, México,  
C.P. 62550,  
teléfono: + (52) (777) 329 3600,  
brobles@tlaloc.imta.mx  
jramirez@tlaloc.imta.mx