



## Calibración y verificación de las leyes de descarga de una estructura de control

A. ABEL JIMÉNEZ CASTAÑEDA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

1

2

3

4

5

6

7

8

A

# Calibración y verificación de las leyes de descarga de una estructura de control

A. ABEL JIMÉNEZ CASTAÑEDA

Profesor de Asignatura,  
Facultad de Ingeniería, UNAM

1  
Acrobat Reader  
Haz Click

2  
JIMÉNEZ CASTAÑEDA, A. Abel  
*Calibración y verificación de las leyes de descarga  
de una estructura de control*  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Facultad de Ingeniería, 2023, 78 p.

3  
*Calibración y verificación de las leyes de descarga  
de una estructura de control*

4  
Primera edición impresa, 2017

Primera edición electrónica de un ejemplar (3 MB) Formato PDF  
Publicado en línea el 2 de marzo de 2023

5  
D.R. © 2023, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma  
de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510,  
México, CDMX.

6  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

7  
Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad  
Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o  
transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización  
escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

8  
UNIDAD DE APOYO EDITORIAL  
Cuidado de la edición: Patricia E. García Naranjo  
Diseño editorial y formación: Nismet Díaz Ferro

# Índice

---

<b>Abstract</b> .....	5
<b>Resumen</b> .....	6
<b>1   Introducción</b> .....	7
<b>2   Descripción de la estructura de control</b> .....	10
2.1 Canal de la margen izquierda .....	11
2.2 Canal de la margen derecha .....	12
<b>3   Leyes de descarga con compuertas totalmente abiertas</b> .....	14
3.1 Características del funcionamiento hidráulico de ambos canales .....	14
3.2 Cálculo de perfiles hidráulicos .....	18
3.3 Cálculo del efecto de remanso por pilas .....	18
3.4 Estudio experimental realizado en un modelo físico .....	22
3.4.1 Mediciones realizadas en el canal de la margen izquierda .	26
3.4.2 Mediciones realizadas en el canal de la margen derecha ..	27
3.5 Calibración y verificación de la fórmula de Hinds .....	28
3.5.1 Calibración para las pilas del canal de la margen izquierda.	29
3.5.2 Calibración para las pilas del canal de la margen derecha ..	32
3.6 Cálculo de las leyes de descarga en los canales del prototipo .	35
3.6.1 Ley de descarga del canal de la margen izquierda .....	35
3.6.2 Ley de descarga del canal de la margen derecha .....	37

1	<b>4   Capacidad de descarga con compuertas parcialmente abiertas . 40</b>
	4.1 Modelo numérico . . . . . 42
2	4.1.1 Experimentos realizados por Buyalski (1983) . . . . . 42
	4.1.2 Contribución de Ferro (2000) . . . . . 43
	4.1.3 Contribución de Shahrokhnia y Javan (2006) . . . . . 44
	4.1.4 Contribución de Bijankhan et al. (2013) . . . . . 45
3	4.1.5 Aplicación del modelo de Bijankhan et al. (2013) . . . . . 47
	4.2 Estudio experimental . . . . . 50
	4.2.1 Sitio de medición de tirantes y abertura de compuertas . . . 50
4	4.2.2 Pruebas en el canal de la margen izquierda . . . . . 52
	4.2.3 Pruebas en el canal de la margen derecha . . . . . 56
	4.3 Calibración del modelo numérico . . . . . 58
	4.3.1 Canal de la margen izquierda . . . . . 58
	4.3.2 Canal de la margen derecha . . . . . 61
5	4.4 Leyes de descarga de la estructura de control El Macayo . . 63
	4.4.1 Ley de descarga del canal de la margen izquierda . . . . . 63
	4.4.2 Ley de descarga del canal de la margen derecha . . . . . 64
6	<b>5   Conclusiones y recomendaciones . . . . . 66</b>
7	<b>6   Reconocimientos . . . . . 68</b>
8	<b>7   Testimonio de gratitud . . . . . 69</b>
A	<b>8   Referencias . . . . . 70</b>
	<b>Apéndice. Método de paso estándar . . . . . 72</b>

1

2

3

4

5

6

7

8

A

## Abstract

---

An experimental investigation was made on a physical hydraulic model of a control structure; the results are used to make the calibration of stage-discharge relationship of the control structure, where there are two separate sets of radial gates, which are part of the control structure. One study of calibration consists in calculating the effect of backwater that produce the piers used to support each set of radial gates; the other study of calibration comes with the adequacy of a law of discharge for radial gates; the numerical model employed is parametric, the power law type. Calibrated and verified with data measured in laboratory functions are used to determine the laws of structure prototype.

1

2

3

4

5

6

7

8

A

## Resumen

---

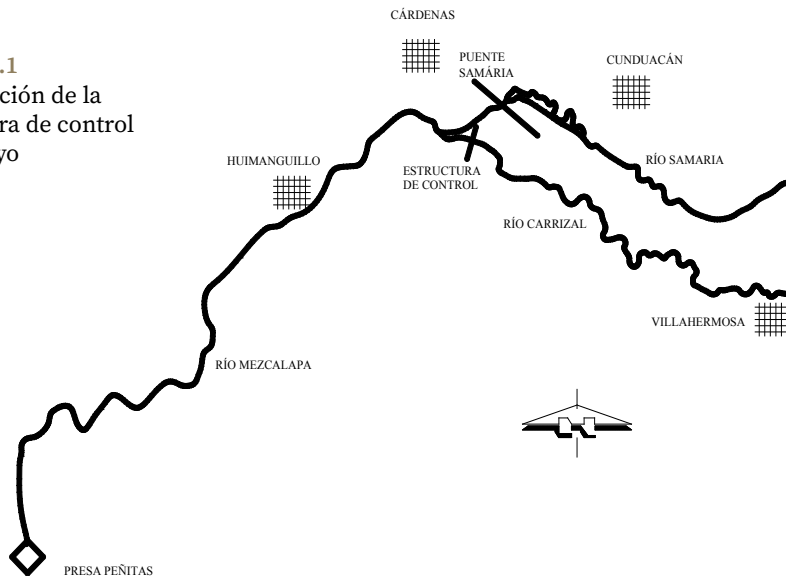
Se presentan los estudios realizados en un modelo físico, cuyos resultados son empleados para hacer la calibración de las leyes de descarga de dos canales, donde se tienen sendos conjuntos de compuertas radiales, las cuales forman parte de una estructura de control. Uno de los estudios de calibración consiste en el cálculo del efecto de remanso que producen las pilas empleadas para apoyar cada conjunto de compuertas radiales; el otro estudio de calibración trata con la adecuación de una ley de descarga para dichas compuertas; la ley de descarga empleada es paramétrica, del tipo ley de potencia. Las funciones calibradas y verificadas con datos medidos en laboratorio son empleadas para determinar las leyes de descarga de la estructura prototipo.

## 1

## Introducción

La estructura de control El Macayo se localiza sobre el río Carrizal, aproximadamente a 2.5 km aguas abajo de la bifurcación del río Mezcalapa en los ríos Samaria y Carrizal, en el estado de Tabasco, ver esquema de la figura 1.1. Esta estructura fue construida para controlar los caudales que transporta el río Carrizal, y así disminuir el riesgo de que este río se desborde e inunde parte de la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

**Figura 1.1**  
Localización de la  
estructura de control  
El Macayo



Se sabe que después de la construcción de esta estructura de control, el tramo inicial del río Carrizal que está comprendido entre la bifurcación y la estructura de control tiene un notable proceso de azolve; para estudiar



1

alternativas cuyo objetivo sea mejorar el funcionamiento hidráulico de este tramo, se dispone de varios modelos matemáticos; algunos se basan en la hipótesis de flujo unidimensional, y otros, en considerar que el flujo es del tipo bidimensional horizontal; cualquiera de esos modelos requieren como información básica las condiciones iniciales y de frontera; una de esas condiciones es la capacidad de descarga de la estructura, también conocida como la ley de descarga.

2

3

Las características particulares de esta estructura dan lugar a que haya varias leyes de descarga, ya que ella está integrada fundamentalmente por una cortina permeable, un canal en la margen izquierda con tres compuertas radiales y otro canal en la margen derecha con cuatro compuertas radiales; por ello, unas leyes corresponden al caso de tener todas las compuertas totalmente abiertas, en cada uno de los dos canales, y otras a la operación de ellas.

4

5

En México, la normatividad indica que después de diseñar una obra hidráulica, se debe revisar el correspondiente funcionamiento hidráulico, con base en un modelo físico construido a una escala adecuada; esto permite tener la posibilidad de revisar la ley de descarga de la estructura de control, y en caso de ser necesario, que el modelo numérico sea calibrado y verificado con mediciones obtenidas en el modelo físico.

6

7

Así, el principal objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo del estudio realizado para obtener las leyes de descarga de la estructura de control El Macayo, expresadas con modelos numéricos calibrados y verificados con mediciones hechas en experimentos de laboratorio. Para ello, en el capítulo dos se describe la estructura de control en estudio, es decir, se indican las dimensiones de los canales, pilas y compuertas que forman parte de la estructura de control.

8

A

1

En el caso particular de la estructura El Macayo, en cada uno de los dos canales, es notable el efecto de remanso que producen las pilas donde se apoyan las compuertas radiales; en este trabajo se propone calcular el efecto de remanso como se hace en el cálculo de la pérdida de energía local en transiciones bruscas; la expresión empleada requiere de un coeficiente que depende del tipo de transición, cuyo valor se calibra y verifica para cada canal, con base en las correspondientes mediciones hechas en laboratorio. El desarrollo de esta parte del estudio se presenta en el capítulo tres.

2

3

4

Con respecto al cálculo de la capacidad de descarga de las compuertas radiales, se emplea un modelo numérico relativamente nuevo, deducido con base en la teoría de la similitud. El modelo se distingue porque es una ley paramétrica de potencia, donde se emplea la expresión para calcular el tirante crítico de una sección transversal de forma rectangular. Esta ley se calibra y verifica con una sencilla función y valores medidos en laboratorio, lo cual se describe en el capítulo cuatro.

5

6

Finalmente, en el capítulo cinco se incluyen las conclusiones y recomendaciones obtenidas al realizar el presente estudio.

7

8

A

## 2 Descripción de la estructura de control de flujo

La estructura de control El Macayo está formada por dos canales de descarga construidos sobre sendas márgenes del río Carrizal, y una cortina a lo ancho del cauce, cuya corona está a la elevación de 22 msnm. En la figura 2.1 se incluye la fotografía de la estructura.

Figura 2.1 Estructura de control El Macayo, Tabasco



Ambos canales están formados por un canal de llamada, un conjunto de pilas donde se apoyan las compuertas de tipo radial que controlan la descarga del flujo, y un tanque amortiguador, cuya finalidad es la de disipar la energía por medio de un salto hidráulico, para entregar el flujo en condiciones admisibles al río; después del tanque amortiguador está el canal de descarga.

1

En la figura 2.2 se incluye el esquema del perfil longitudinal donde se indican las principales características geométricas de cualquiera de los dos canales; a continuación se describe con detalle cada uno de ellos.

2

3

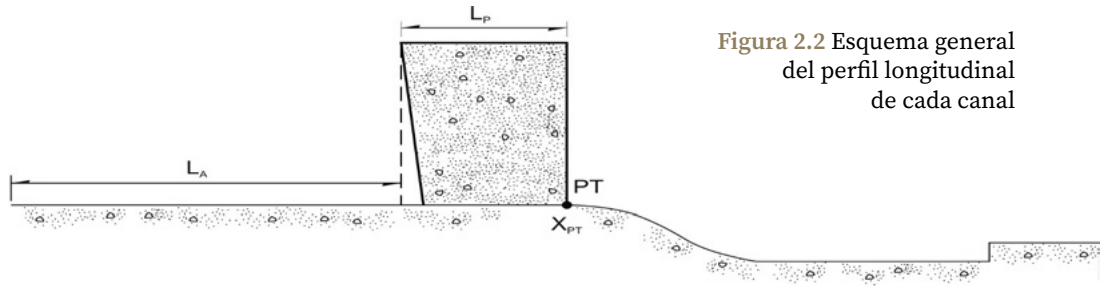


Figura 2.2 Esquema general del perfil longitudinal de cada canal

4

5

## 2.1 Canal de la margen izquierda

6

El canal de llamada de la margen izquierda inicia con una curva horizontal, cuya plantilla está a la elevación 12 msnm; el ancho disminuye de manera gradual, en una longitud de 166.3 m; en ese tramo el talud de ambas márgenes también cambia de manera gradual, hasta donde inicia el tramo del canal con sección transversal rectangular, con longitud de 32 m. Después están dos pilas con espesor de 1.00 m, cuya nariz es del tipo redondeado y a desplome, con pendiente de 7; la longitud  $L_A$ , desde donde inicia el canal hasta la nariz de las pilas, es de 198.3 m, mientras que la distancia  $L_p$  entre la nariz de las pilas y el punto  $PT$ , donde inicia la curva vertical, es de 22.30 m.

7

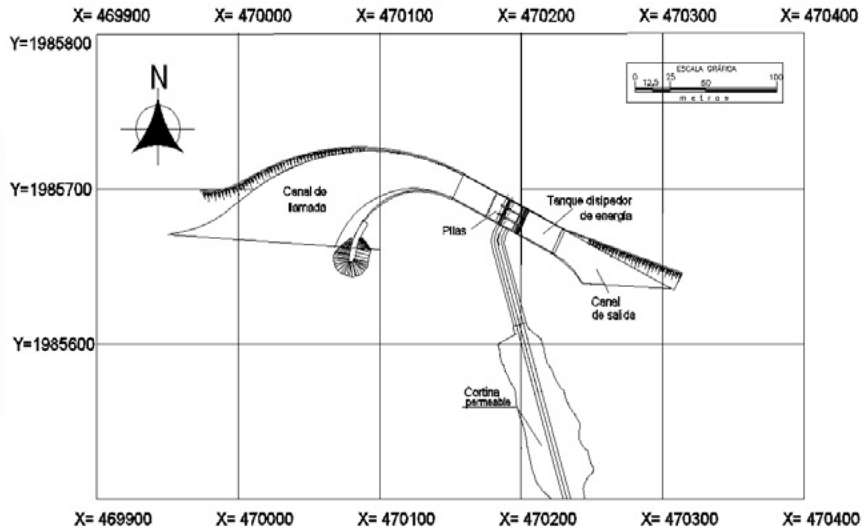
8

Este canal tiene tres compuertas radiales de 5 m de ancho cada una, con radio de 8.6 m; la altura del perno con respecto a la plantilla del canal es de 4.8 m.

A

En la figura 2.3 se presenta una versión simplificada del plano del canal de la margen izquierda.

Figura 2.3 Versión simplificada del plano del canal de la margen izquierda, El Macayo



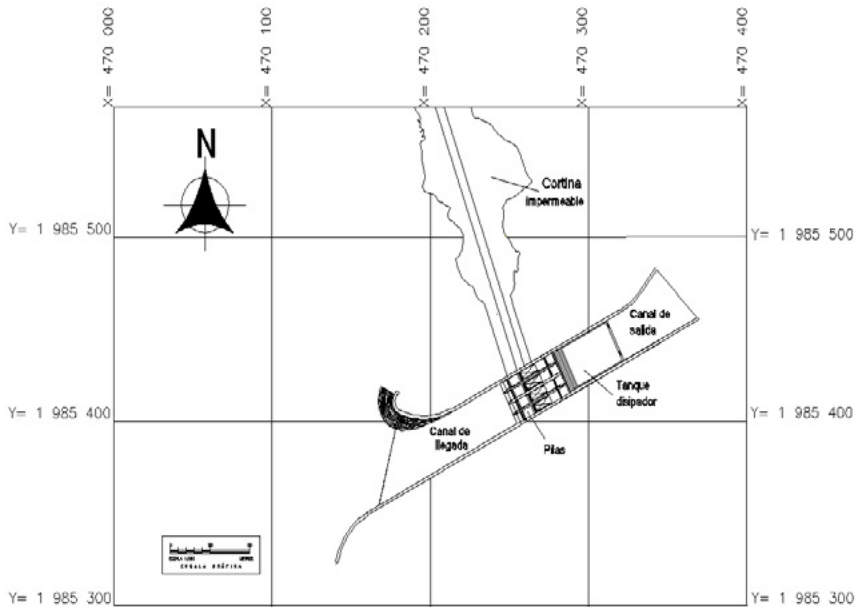
## 2.2 Canal de la margen derecha

Este canal también inicia con una plantilla horizontal a la elevación de 12 msnm, con una contracción gradual, cuya longitud es de 50.88 m; a lo largo de la misma el muro de la margen derecha es perpendicular a la plantilla, mientras que el talud de la margen izquierda varía a lo largo de la transición, hasta llegar a ser perpendicular. Posteriormente, la sección transversal del canal es de forma rectangular, en una distancia de 34.12 m; después, se tiene el conjunto de pilas donde están apoyadas las compuertas; la distancia  $L_A$ , desde el inicio del canal de llamada hasta la nariz de las pilas, es de 85 m.

El canal tiene cuatro compuertas radiales de 5 m de ancho cada una apoyadas sobre tres pilas de 1.5 m de ancho, el radio de estas compuertas es 10.80 m, y la altura del perno con respecto a la plantilla del canal es 6.5 m; la longitud de las pilas es 36.7 m, y la distancia que hay entre la nariz de las pilas y el punto de tangencia donde inicia la curva vertical es de 32.3 m. En la figura 2.4 se presenta el plano de este canal.

Como comentario, las plantillas de los tanques disipadores de ambos canales están a la elevación de 8 msnm, y entregan el agua al río Carrizal por medio de los canales de salida.

Figura 2.4 Versión simplificada del plano del canal de la margen derecha, El Macayo

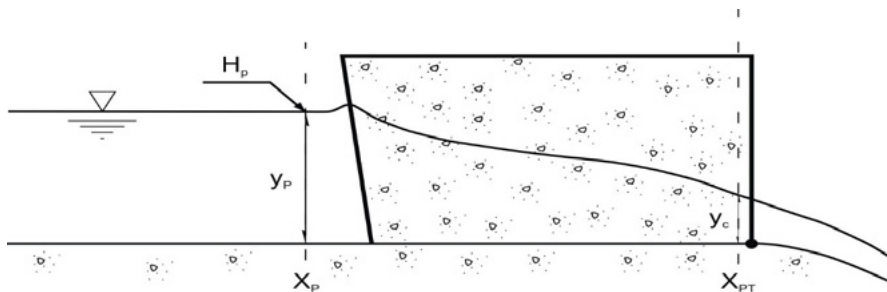


# 3 Leyes de descarga con compuertas totalmente abiertas

## 3.1 Características del funcionamiento hidráulico de ambos canales

El tramo del río Carrizal, que está comprendido entre la bifurcación y la estructura de control, es de pendiente pequeña y presenta cambios notables en el ancho de sus secciones transversales, los cuales varían entre 200 y 400 m; en cambio, el ancho total de ambos canales de la estructura, en el tramo donde están las pilas, con todas las compuertas totalmente abiertas, es de 35 m. Este notable estrechamiento da lugar a que la estructura produzca un remanso, por lo que en el tramo del río Carrizal que está ubicado aguas arriba de los canales de acceso, se tiene un flujo en régimen subcrítico. Así, en ambos canales de acceso, cuya plantilla es horizontal, el flujo ingresa en régimen subcrítico y continua con el mismo hasta donde inician las curvas verticales de los tanques de amortiguamiento, cuyo punto de tangencia *PT* está prácticamente al final del tramo comprendido por la longitud de las pilas (ver figura 3.1).

**Figura 3.1** Características del perfil hidráulico en el tramo donde están las pilas



1

2

3

4

5

6

7

8

A

La sección transversal que se localiza en el punto de tangencia  $X_{PT}$  es donde teóricamente hay un cambio de régimen subcrítico a supercrítico, por lo que ahí se tiene una sección de control asociada al tirante crítico  $y_c$ . Por tanto, desde esa sección se forma un perfil hidráulico del tipo H2 hacia aguas arriba, a lo largo de cada vano, en el cual es notable el efecto de remanso producido por el estrechamiento del canal donde están las pilas. Este tipo de funcionamiento hidráulico permite deducir que la elevación de la superficie libre del agua, denotada como  $H_p$ , que se tiene aguas arriba de las pilas, en la sección  $X_p$ , depende directamente del tirante crítico que se tiene en la sección asociada al punto de tangencia, y por tanto, que en ambas secciones el tirante o la cota del agua son función del caudal que descarga el canal, cuando las compuertas están totalmente abiertas (véase la figura 3.1).

Es conveniente hacer notar que, por un lado, la capacidad de descarga de estos dos canales depende de varios factores, como la rugosidad de la plantilla y paredes, la pendiente de la plantilla, las curvaturas de los tramos iniciales y la presencia de las pilas. En estos canales, el efecto más importante es el remanso producido por la presencia de las pilas. Por otro lado, en cada uno de los canales se tiene una escala que permite leer la elevación de la superficie libre del agua  $H_p$ , dicha escala se localiza aproximadamente a 10m hacia aguas arriba de la nariz de las pilas de ambos canales, como se indica en las fotografías que se incluyen en las figuras 3.2a y 3.2b.



1

Figura 3.2a Escala para leer  $H_p$  en el canal de la margen izquierda



2

3

4

Figura 3.2b Escala para leer  $H_p$  en el canal de la margen derecha



5

6

7

8

A

Así, el hecho de que las escalas estén a unos cuantos metros de la nariz de las pilas, evita la necesidad de incluir los efectos en la capacidad de descarga de los canales, que son producidos por las curvas horizontales que se tienen en ambos canales de llamada; además, la localización de las escalas disminuye la incertidumbre que se tiene con respecto a la

1

resistencia al flujo en los canales de acceso, desde la entrada hasta donde están las pilas. Por tanto, es notable la conveniencia de que la ley de descarga de cada canal esté referida a la elevación del nivel del agua en donde se tienen las escalas; inclusive, es recomendable emplear la lectura del nivel del agua en las escalas para conocer la carga con la que funcionan las compuertas cuando están parcialmente abiertas. Esto permite que las curvas elevaciones-caudales que se determinan en este trabajo estén asociadas a la misma sección transversal de cada canal, a unos cuantos metros aguas arriba de cada conjunto de pilas, donde se dispone de escalas para leer la elevación de la superficie libre del agua.

2

3

4

5

6

7

8

A

En cuanto al cálculo del remanso producido por la presencia de las pilas, existen varios métodos que se recomiendan para calcular este efecto; uno de los métodos más conocidos es el publicado por Yarnell (1934a) y (1934b), quien recomienda una ecuación empírica; otros métodos de cálculo están descritos de manera detallada, por ejemplo, en Sturm (2010), los cuales se basan en emplear las ecuaciones de la energía, de momentum y de continuidad; sin embargo, todos esos métodos son válidos para pilas de puentes que están en cauces, donde en ninguno de los casos considerados se tiene un tanque de amortiguamiento aguas abajo de las pilas, como los que se tienen en los canales que se estudian en este trabajo. Así, puesto que los canales de la estructura en estudio son del tipo artificial y de sección rectangular, donde se acepta la hipótesis de que se conoce la localización del tirante crítico, para obtener la ley de descarga de cada canal, con las compuertas totalmente abiertas, en este trabajo se propone un procedimiento sencillo, que se basa en calcular en forma detallada el perfil hidráulico; para ello se emplea la ecuación de la energía, donde se incluye el efecto de las pilas con una pérdida de energía local, cuya expresión se calibra y verifica con base en un estudio experimental, como se describe a continuación.

1

### 3.2 Cálculo de perfiles hidráulicos

2

La manera tradicional de obtener la ley de descarga de un canal de acceso, como los que se tienen en la estructura de control El Macayo, se basa en hacer el cálculo de perfiles hidráulicos; para ello se considera que son válidas las hipótesis de flujo unidimensional en régimen permanente y gradualmente variado. En este caso particular, los perfiles hidráulicos se calculan desde la sección de control, denotada con el cadenamiento  $X_{PT}$ , hasta la sección  $X_P$ , donde están las escalas (ver figura 3.1).

3

4

Entre los métodos de cálculo de perfiles hidráulicos de flujo gradualmente variado, destaca el de paso estándar; este método es ampliamente recomendado para calcular perfiles hidráulicos en canales no prismáticos, pues permite incluir la pérdida de energía por transición. En el apéndice que se incluye al final del presente trabajo, se describen con detalle todas las expresiones que se emplean con este método de cálculo.

5

6

### 3.3 Cálculo del efecto de remanso por pilas

7

Las pilas en las que se apoyan las compuertas radiales afectan de manera notable el campo de velocidades y el perfil de la superficie libre del agua; este efecto se observa de manera clara en la vecindad de la nariz de las pilas, donde el flujo es notablemente del tipo tridimensional, lo cual se observa en la fotografía que se incluye en la figura 3.3, que corresponde a las pilas del canal de la margen izquierda.

8

A

1

2

3

4

5

6

7

8

A

Figura 3.3 Efectos de las pilas en las características del flujo



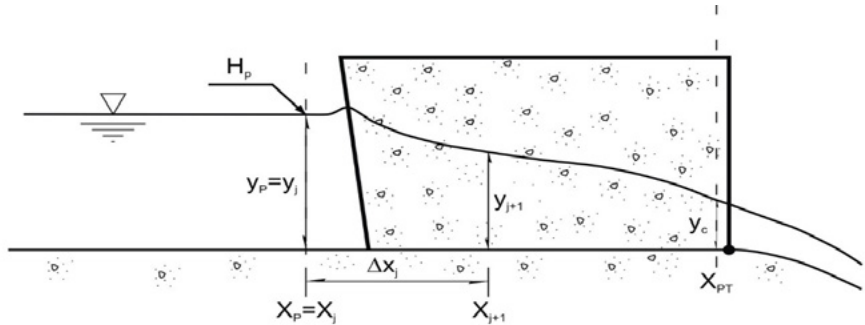
Un procedimiento sencillo para calcular el remanso debido a las pilas que están en los canales artificiales que se estudian en este trabajo, consiste en considerar que la presencia de estas producen una pérdida de energía local, como la que se tiene en una transición; una de las fórmulas que se recomienda para calcular la pérdida de energía por contracción, denotada como  $h_{ij}$ , es la propuesta por Hinds (1928), la cual se expresa como sigue

$$h_{ij} = C_0 \left[ \frac{V_{j+1}^2}{2g} - \frac{V_j^2}{2g} \right] \quad (3.1)$$

Donde las cargas de velocidad se calculan en las secciones transversales siguientes (véase la figura 3.4): sección  $X_j$ , a unos cuantos metros aguas arriba de la nariz de las pilas, en donde no se tiene el efecto de la nariz de las pilas; sección  $X_{j+1}$ , localizada a unos metros aguas abajo de la nariz de las pilas, donde el flujo pueda ser considerado como del tipo unidimensional.

1

Figura 3.4 Secciones empleadas para calcular el efecto de remanso por pilas



2

3

En cuanto al valor del coeficiente  $C_0$ , este depende del tipo de la transición. Por ejemplo, en el manual de referencia del modelo matemático *HEC-RAS* (U. S. Army Corps of Engineers, 2010), se indica que el coeficiente de contracción en secciones típicas de puentes con pilas en el cauce es  $C_0 = 0.30$ ; en el caso de que la contracción sea del tipo brusca, entonces  $C_0 = 0.60$ .

4

5

La vista en planta de las pilas indica que la forma es parecida a la denominada en el idioma inglés como *lens*, la cual se distingue porque el contorno de la nariz queda definido por dos arcos de círculo, cuyo radio es igual al doble del ancho de las pilas (ver Jain, 2001), que son tangentes al paño lateral de las pilas. Sin embargo, la forma de la nariz de las pilas de estos canales está definida por dos curvas circulares de radio  $R_1$ , que son tangentes al paño lateral de las pilas y a un círculo de radio igual a  $R_2$ , justo en la nariz, como se ilustra en la figura 3.5; en la tabla 3.1 se incluyen los valores de los radios que están reportados en los planos ejecutivos de estas estructuras y algunas otras dimensiones de cada conjunto de pilas, como por ejemplo, el ancho  $e$  de las mismas. En particular, la nariz de las pilas del canal de la margen izquierda está desplomada, con pendiente de 7; en cambio, la nariz de las pilas del canal de la margen derecha es vertical.

6

7

8

A

Figura 3.5 Vista en planta del contorno de la nariz de las pilas

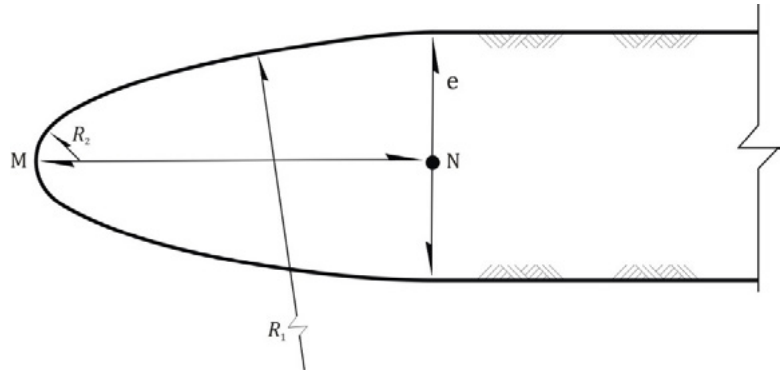


Tabla 3.1 Dimensiones de la nariz de las pilas

Canal	$e$ , en m	$R_1$ , en m	$R_2$ , en m	$\overline{MN}$ , en m
Margen izquierda	1.0	2.96	0.08	1.58
Margen derecha	1.5	5.42	0.30	2.40

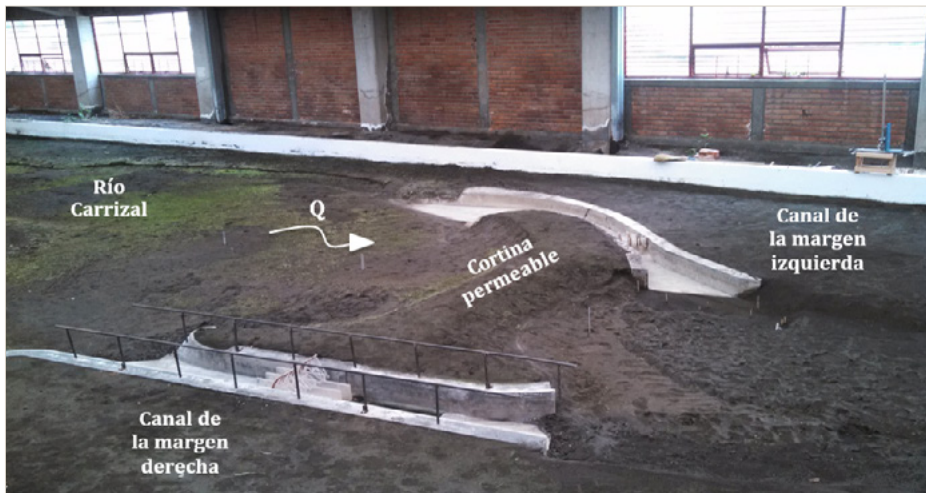
Estas particularidades de la nariz de las pilas y la escasa información disponible con respecto al coeficiente de contracción, dan lugar a tener incertidumbre con respecto al valor más adecuado del coeficiente  $C_0$ , que corresponda al caso en estudio. En Jiménez *et al.* (2014) se presenta un análisis de sensibilidad con respecto al coeficiente  $C_0$ . El análisis consiste en calcular el perfil hidráulico en cada canal para el correspondiente caudal de diseño, con los valores de coeficientes de  $C_0 = \{0.0, 0.3, 0.6\}$ . Los resultados obtenidos indican que, para el canal de la margen izquierda, con los coeficientes de 0.0 y 0.60, se tiene una diferencia de 0.424 m del nivel del agua, aguas arriba de las pilas; mientras que para el canal de la margen derecha la diferencia es de 0.382 m. Estas diferencias, que en promedio son de 0.40 m, dan lugar a tener incertidumbre en la determinación

de las leyes de descarga; para reducir dicha incertidumbre es necesario hacer un estudio experimental, cuyos resultados permitan calibrar y verificar el valor del coeficiente que se incluye en la fórmula de Hinds (1928).

### 3.4 Estudio experimental realizado en un modelo físico

La mejor manera de obtener los valores del coeficiente  $C_0$  para cada conjunto de pilas, consiste en hacer mediciones en el laboratorio. Afortunadamente, en la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se tiene el modelo físico de la estructura de control El Macayo; la escala geométrica de dicho modelo es 1:60, sin distorsión. En la figura 3.6 se incluye la correspondiente fotografía.

Río Figura 3.6 Modelo físico de la estructura de control El Macayo



El caudal que ingresa al modelo se mide con un vertedor rectangular de cresta delgada, sin contracciones laterales. En la figura 3.7 se muestra la fotografía del vertedor. Para calcular el gasto que descarga el vertedor se utilizó la fórmula de Rehbock (1929)

$$Q_m = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L h^{3/2} \left( 0.605 + \frac{1}{1049 h - 3} + \frac{0.08 h}{P} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

$L$  Longitud de la cresta, en m

$P$  Paramento de la cresta, en m

$h$  Carga sobre la cresta, en m

La longitud de la cresta del vertedor es  $L = 1.20$  m; la altura del paramento de la cresta es  $P = 1.685$  m; para la determinación de la carga sobre la cresta del vertedor se midió la tara del mismo, cuyo valor fue de 0.224 m.

Figura 3.7 Canal de acceso, vertedor y limnómetro utilizados para aforar





Para relacionar los caudales de diseño de los canales del prototipo con los que se deben tener en el modelo físico se utilizó la expresión siguiente, la cual es válida para modelos físicos, sin distorsión

$$Q_M = \frac{Q_P}{E_L^{2.5}} \quad (3.3)$$

Donde:

$E_L$  Escala de longitudes del modelo físico,  $E_L = 60$

$Q_M$  Gasto en el modelo físico, en  $\text{m}^3/\text{s}$

$Q_P$  Gasto en el prototipo, en  $\text{m}^3/\text{s}$

El sitio donde se midió la elevación de la superficie libre del agua, por efecto de remanso de las pilas, fue al centro de una sección transversal ubicada a 0.10 m aguas arriba de la nariz de la pila central de cada canal; en cada uno de esos sitios también se midió la elevación de la plantilla; ambas mediciones se hicieron con un limnómetro de punta, y para tener una correspondencia directa de las elevaciones del modelo físico con las del prototipo, se asignó a la elevación de la plantilla de cada canal del modelo la cota de 0.20 m, pues la cota de la plantilla de los canales prototipo es de 12 msnm. Al mencionado sitio de medición en el modelo se le denominó como el punto  $P$ . Se aclara que la localización de este punto se determinó de tal manera que las medidas que se hicieran de la elevación de la superficie libre del agua no estuvieran afectadas por las pequeñas ondas estacionarias que se forman alrededor de la nariz de cada pila, las cuales se notan en las fotografías que se incluyen en las figuras 3.3 y 3.8.

1

Figura 3.8 Sitio de medición en el canal de la margen derecha



2

3

4

5

Se hace notar que el efecto de remanso que se observa en el modelo físico (figura 3.8) es similar al de la fotografía del funcionamiento que se muestra en el prototipo, la cual se incluye en la figura 3.3.

6

La realización de cada prueba consistió en fijar y mantener un caudal de ingreso constante al modelo físico, mientras se registraba el nivel del agua en el punto ; cada prueba requirió aproximadamente una hora, para que con base en las lecturas de los niveles de la superficie libre del agua en el punto , se considerará que se tenía un flujo en régimen permanente en el modelo físico. Durante cada una de las pruebas realizadas se estuvo verificando que la carga sobre el vertedor se mantuviera constante, y que la vena líquida se mantuviera despegada de la cresta, especialmente para gastos pequeños.

7

8

A

### 3.4.1 Mediciones realizadas en el canal de la margen izquierda

Durante las pruebas realizadas en este canal, se colocó un dique de arena aguas arriba de las pilas del canal de la margen derecha, con la finalidad de tener la certeza de que el gasto aforado estuviera pasando en su totalidad por el canal en estudio. Los caudales empleados en cada uno de los tres experimentos realizados en este canal se reportan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Gastos del estudio experimental del canal de la margen izquierda

Lectura en el Limnómetro, en m	$h$ , en m	$Q_M$ , en m <sup>3</sup> /s	$Q_P$ , en m <sup>3</sup> /s
0.20245	0.02155	0.00737	205.516
0.1968	0.0272	0.01026	286.105
0.1927	0.0313	0.01256	350.242

En la tabla 3.3 se reportan los valores medidos del tirante,  $y_P$ , y la correspondiente elevación de la superficie libre del agua,  $H_P$ , en el llamado sitio  $P$ , junto con el correspondiente caudal, para las tres pruebas realizadas en el modelo físico. Se aclara que  $H_P = Z_P + y_P$ , donde  $Z_P = 0.20$  m.

**Tabla 3.3** Mediciones de las pruebas en el canal de margen izquierda

$Q_M$ , en m <sup>3</sup> /s	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.00737	0.0676	0.2676
0.01026	0.0845	0.2845
0.01256	0.0927	0.2927

### 3.4.2 Mediciones realizadas en el canal de la margen derecha

Nuevamente, la sección inmediata aguas arriba de las pilas, donde se asignó la ubicación del punto  $P$ , se encuentra a una distancia de 0.10 m de la nariz de la pila central, ver figura 3.9. Las mediciones en este punto se llevaron a cabo de manera similar a las del otro canal, es decir, una vez que no hubo variaciones en el nivel de la superficie libre del agua, se midió con ayuda del limnómetro de punta la cota de la superficie libre del agua y del fondo del canal, cuya diferencia es igual al tirante en la sección del sitio  $P$ ; con la suma de la elevación de la plantilla,  $Z_p = 0.20$  m, más el tirante  $y_p$  se obtiene el nivel del agua,  $H_p$ , en la misma sección transversal.

También en este caso, para asegurar que el gasto aforado de entrada al modelo fuera el mismo que pasa por el canal de la margen derecha, se colocó un dique de arena apoyado por una tabla de triplay en la entrada del canal de la margen izquierda. En este caso se realizaron mediciones para cuatro diferentes gastos en modelo. En la tabla 3.4 se incluyen los gastos  $Q_M$ , empleados en el modelo, y los correspondientes caudales en prototipo  $Q_P$ .

**Figura 3.9**  
Sitio de medición  
en el canal de la  
margen derecha



1

**Tabla 3.4** Gastos empleados en el estudio experimental del canal de la margen derecha

Lectura en el Limnómetro, en m	$h$ , en m	$Q_M$ , en m <sup>3</sup> /s	$Q_P$ , en m <sup>3</sup> /s
0.19780	0.02620	0.00972	271.16423
0.19589	0.02811	0.01076	299.95380
0.19000	0.03400	0.01416	394.75736
0.18030	0.04370	0.02041	569.07238

2

3

4

En la tabla 3.5 se reportan las lecturas del tirante  $y_P$  realizadas en el sitio  $P$ , para sendas pruebas realizadas, y las correspondientes elevaciones de la superficie libre del agua.

5

**Tabla 3.5** Mediciones de las pruebas hechas en el canal de la margen derecha

$Q_M$ , en m <sup>3</sup> /s	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.00972	0.0613	0.2613
0.01076	0.0742	0.2742
0.01416	0.0859	0.2859
0.02041	0.1085	0.3085

6

7

8

### 3.5 Calibración y verificación de la fórmula de Hinds

La calibración del coeficiente  $C_0$  se hizo con base en las dimensiones de los canales y pilas del modelo físico, y los valores medidos de caudales y tirantes en las pruebas de laboratorio; es decir, el modelo físico fue

A

1

empleado como prototipo para obtener el valor de  $C_0$ , que permitiera calcular con aproximación confiable el efecto de remanso producido por las pilas. Así, se utilizó el método de prueba y error; es decir, se hizo el cálculo de los correspondientes perfiles hidráulicos con cada uno de los caudales empleados en el modelo físico; y el nivel del agua calculado aguas arriba de la nariz de las pilas se comparó con el correspondiente valor medido en laboratorio. La serie de pruebas se hizo hasta tener un valor del coeficiente  $C_0$ , tal que el valor absoluto de la diferencia entre los valores de los tirantes calculados y medidos aguas arriba de las pilas, fuera del orden de 1 mm, para los gastos empleados en el modelo físico.

2

3

4

El cálculo de los perfiles se realizó con un modelo matemático desarrollado en lenguaje Fortran Estándar; el método de cálculo que se emplea es el de paso estándar, para flujo con régimen subcrítico en canales no prismáticos, puesto que la presencia de las pilas hace que dicho canal no sea prismático en el tramo analizado. En el apéndice A que se incluye al final de este trabajo, se presentan en forma detallada las expresiones que se emplean en el método de paso estándar, y también el método numérico de solución.

5

6

### 3.5.1 Calibración para las pilas del canal de la margen izquierda

7

Se emplearon 13 secciones transversales para calcular los perfiles hidráulicos en el canal de margen izquierda, las cuales fueron seleccionadas de manera que la dirección de la velocidad media del flujo fuera perpendicular a ellas; además, donde no se observaran efectos notables de flujo tridimensional, es decir, donde se consideró que se cumple en forma adecuada con la hipótesis de flujo unidimensional. El espaciamiento entre

8

A

las secciones transversales cerca de la sección de control fue de 0.03 m; en la tabla 3.6 se reportan los cadenamientos y anchos de plantilla de las secciones transversales empleadas en el cálculo de los perfiles hidráulicos, donde la sección asociada a  $X = 0.00$  m, corresponde a la que está a 12 m aguas arriba de donde se tienen las escalas en el canal del prototipo. Es conveniente recordar que en esta etapa de la calibración, se emplearon las dimensiones del modelo físico.

El valor del coeficiente de rugosidad de Manning que se utilizó fue de 0.016; dicho valor se asignó con base en la inspección del acabado de la plantilla del canal en el modelo.

**Tabla 3.6** Secciones transversales y anchos de plantilla (CMI)

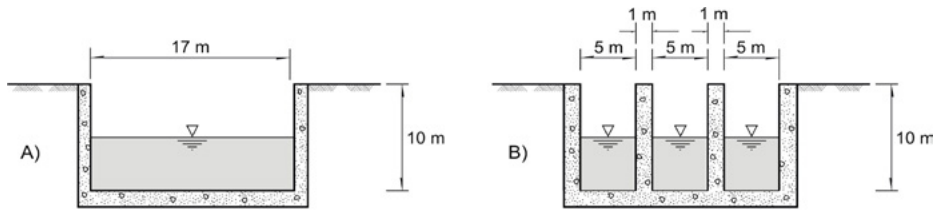
Sección	X, en m	Ancho b, en m
1	0.000	0.283
2	0.200	0.283
3	0.372	0.250
4	0.402	0.250
5	0.432	0.250
6	0.462	0.250
7	0.492	0.250
8	0.522	0.250
9	0.552	0.250
10	0.582	0.250
11	0.612	0.250
12	0.642	0.250
13	0.672	0.250

1

En la figura 3.10 se presentan las secciones tipo empleadas en el cálculo de los perfiles hidráulicos, donde las dimensiones corresponden a las del prototipo; por ello, las dimensiones del modelo físico se obtienen al dividir las magnitudes del prototipo entre 60.

2

**Figura 3.10** Secciones transversales tipo en el canal de la margen izquierda



4

El procedimiento de prueba y error permitió determinar que con  $C_0 = 0.5$ , el cálculo del efecto de remanso que producen las pilas de este canal es del orden de 1 mm de diferencia, en comparación con las mediciones hechas en el laboratorio; es decir, la diferencia entre los tirantes medidos y los calculados en la sección aguas arriba de la nariz de las pilas, donde se localiza el punto  $P$ , resultó ser menor que 1 mm; la comparación entre los tirantes medidos y calculados se presenta en la tabla 3.7.

5

6

**Tabla 3.6** Tirantes medidos y calculados en la sección  $X_p$  (canal de margen izquierda)

$Q_M$ , en $m^3/s$	$y_{Pm}$ (medido), en m	$y_{Pc}$ (calculado), en m	$(y_{Pm} - y_{Pc})$ en m
0.0074	0.0675	0.0670	0.0005
0.0103	0.0835	0.0830	0.0005
0.0126	0.0952	0.0946	0.0006

7

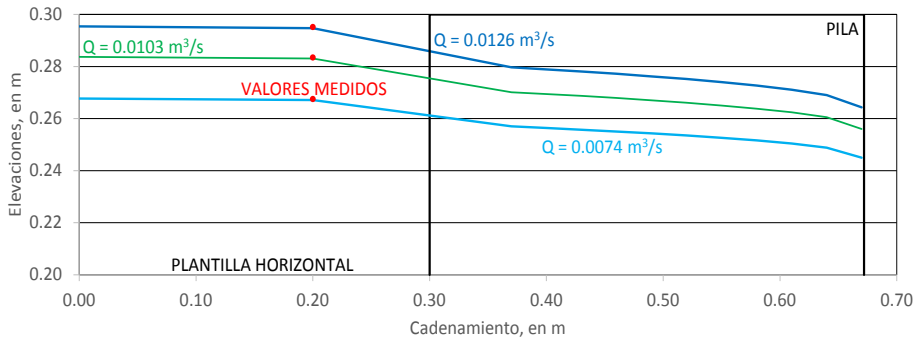
8

En la figura 3.11 se presentan los perfiles hidráulicos calculados con  $C_0 = 0.5$  y los valores medidos en el modelo físico.

A



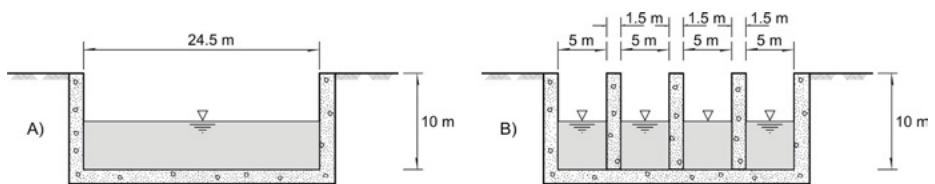
Figura 3.11 Calibración del coeficiente  $C_0$  en el canal de la margen izquierda



### 3.5.2 Calibración para las pilas del canal de la margen derecha

La geometría de las secciones localizadas aguas arriba de la entrada a las pilas se presenta en el lado izquierdo de la figura 3.12; mientras que la geometría mostrada en el lado derecho, corresponde a las secciones localizadas en el tramo comprendido por la longitud de las pilas, es decir, desde la nariz de las pilas hasta donde está la sección de control, en  $X_{PT}$ .

Figura 3.12 Secciones transversales tipo en el canal de la margen derecha



Nuevamente se realizó el cálculo de los perfiles hidráulicos con las dimensiones del modelo físico y los gastos empleados en el laboratorio, desde la sección denotada como , hasta la sección aguas arriba de la nariz

de las pilas; se utilizaron 17 secciones transversales, cuya ubicación se presenta en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Secciones transversales y anchos de plantilla (CMD)

Sección	X, en m	Ancho $b$ , en m
1	0.000	0.4083
2	0.200	0.4083
3	0.388	0.3333
4	0.418	0.3333
5	0.448	0.3333
6	0.478	0.3333
7	0.508	0.3333
8	0.538	0.3333
9	0.568	0.3333
10	0.598	0.3333
11	0.628	0.3333
12	0.658	0.3333
13	0.688	0.3333
14	0.718	0.3333
15	0.748	0.3333
16	0.778	0.3333
17	0.808	0.3333

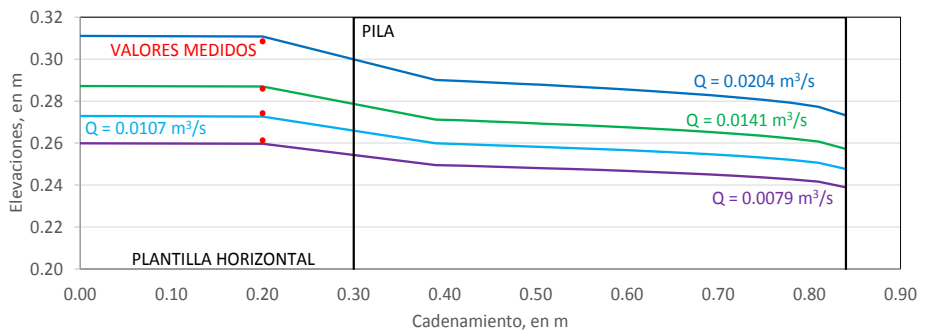
Para este tramo del canal se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning , el cual se determinó con base en la inspección del acabado del tramo de la plantilla del canal en estudio. También se utilizó el procedimiento de prueba y error para determinar que el coeficiente de contracción para las pilas del canal de la margen derecha es , ya que con este valor se obtiene que el valor medio de los errores absolutos obtenidos de la diferencia de los tirantes medidos y calculados es de 1.65 mm. En la tabla 3.8 se presenta la comparación de los tirantes medidos en laboratorio, y los calculados con el método de paso estándar.

**Tabla 3.8** Tirantes medidos y calculados en el canal de la margen derecha

$Q_M$ , en $m^3/s$	$y_{Pm}$ (medido), en m	$y_{Pc}$ (calculado), en m	$(y_{Pm} - y_{Pc})$ en m
0.0097	0.0613	0.0597	0.0016
0.01076	0.0742	0.0726	0.0016
0.01416	0.0859	0.087	-0.0011
0.02041	0.1085	0.1108	-0.0023

En la figura 3.13 se incluyen tanto los perfiles hidráulicos calculados, como los valores medidos en el modelo físico; de manera subjetiva, nuevamente se nota que la coincidencia de las mediciones con los valores calculados es gratamente satisfactoria.

**Figura 3.13** Calibración del coeficiente  $C_0$  en el canal de la margen derecha



1

### 3.6 Cálculo de las leyes de descarga en los canales del prototipo

2

Las leyes de descarga de cada canal se obtienen al hacer el cálculo de perfiles hidráulicos en el tramo comprendido entre los llamados punto  $P$  y el punto de tangencia  $PT$ , que es donde termina la plantilla horizontal del canal y empieza la curva vertical del tanque amortiguador; estos cálculos se realizan empleando la información de las secciones transversales del canal prototipo; asimismo, se utiliza el coeficiente  $C_0 = 0.50$  para incluir el efecto de la presencia de las pilas en el remanso que se produce aguas arriba de ellas; además, se utiliza un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.016 a lo largo del tramo comprendido entre la sección transversal donde están las escalas, sección  $X_p$ , y el extremo final de las pilas, que corresponde a la sección  $X_{PT}$ , puesto que es adecuado considerar que en ese tramo la plantilla y paredes del canal deben ser de concreto, con un acabado normal, sin material arenoso en la plantilla.

3

4

5

6

#### 3.6.1 Ley de descarga del canal de la margen izquierda

7

El cálculo de los perfiles hidráulicos se hizo con los valores de los caudales que están anotados en la primera columna de la tabla 3.9, mientras que en la segunda se reportan los valores de los niveles del agua calculados con el perfil hidráulico en la sección  $X_p$ . En la figura 3.14 se presentan los perfiles hidráulicos calculados.

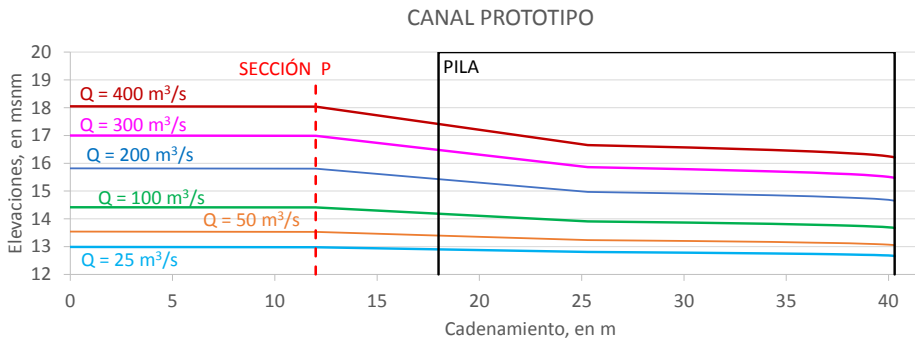
8

A

**Tabla 3.9** Coordenadas de la curva  $H_p - Q$  del canal de la margen izquierda

$Q$ , en $m^3/s$	$H_p$ , en msnm
25	12.98
50	13.53
75	13.99
100	14.41
200	15.81
300	116.98
400	18.04

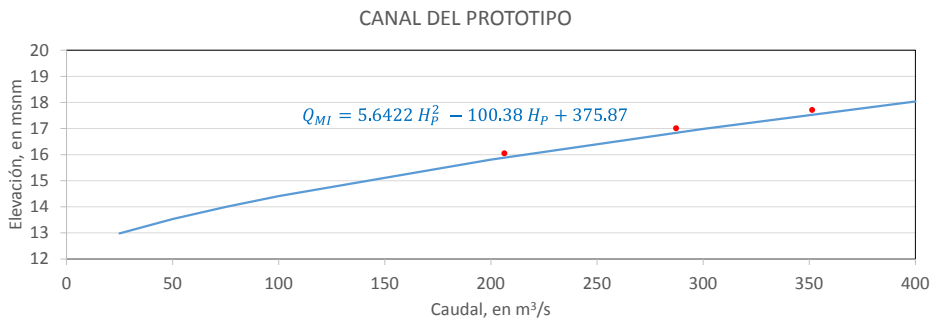
**Figura 3.14** Perfiles hidráulicos calculados en el canal de la margen izquierda



Con base en las coordenadas reportadas en la tabla 3.9, cuya curva se incluye en la figura 3.15, se obtiene la ley de descarga de este canal, la cual también se presenta en la misma figura; en ella se incluyen los puntos medidos en laboratorio, cuyos valores se han escalado a los valores del prototipo.

$$Q_{MI} = 5.6422 H_p^2 - 100.38 H_p + 375.87 \tag{3.3}$$

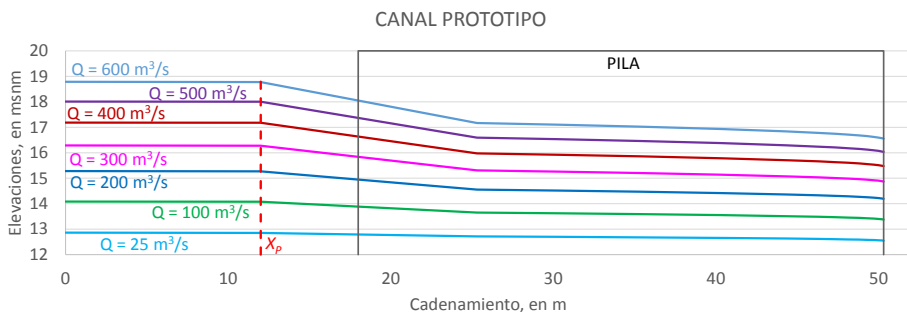
Figura 3.15 Ley de descarga del canal de la margen izquierda en función de  $H_p$



### 3.6.2 Ley de descarga del canal de la margen derecha

De manera similar, se hizo el cálculo de perfiles hidráulicos en el canal de la margen derecha; se utilizó la información de las secciones transversales del canal prototipo; nuevamente, para incluir el efecto de remanso por las pilas se utilizó el coeficiente  $C_0 = 0.5$ ; los caudales para hacer el cálculo de los perfiles hidráulicos están anotados en la primera columna de la tabla 3.10; en la segunda columna se reportan las elevaciones de la superficie libre del agua en la sección  $X_p$ . En la figura 3.16 se presentan los perfiles hidráulicos calculados a lo largo del tramo en estudio.

Figura 3.16 Perfiles hidráulicos calculados en el canal de la margen derecha



Nuevamente, con los valores de la tabla 3.8 se construye la curva de elevaciones-caudales ( $H_p, Q$ ), que corresponde a la sección, donde de manera aproximada está la escala de niveles; esta ley de descarga se muestra en la figura 3.17, donde también se incluye el modelo numérico de la ley de descarga, el cual se expresa como

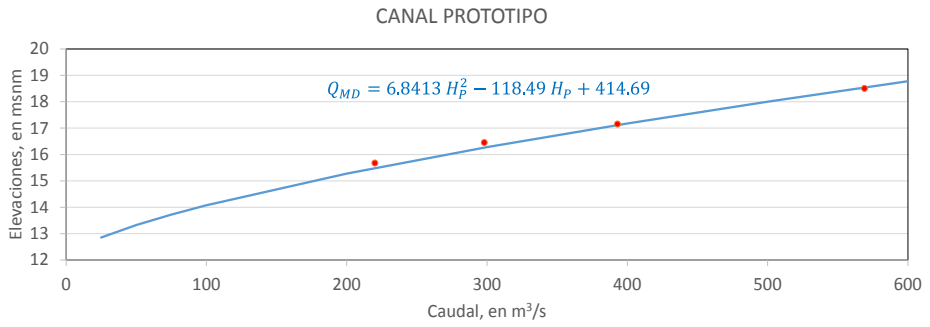
$$Q_{MD} = 6.8413 H_p^2 - 118.49 H_p + 414.69 \quad (3.4)$$

**Tabla 3.10** Coordenadas de la curva  $H_p - Q$  del canal de la margen derecha

$Q$ , en $m^3/s$	$H_p$ , en msnm
25	12.8534
50	13.3245
75	13.7209
100	14.0756
200	15.2724
300	16.2786
400	17.1777
500	18.0045
600	18.7779

Se aclara que los puntos en color rojo que están en la figura 3.17, corresponden a los valores medidos en el modelo físico, pero escalados a las dimensiones del prototipo.

Figura 3.17 Ley de descarga del canal de la margen derecha, en función de  $H_p$



1

2

3

4

5

6

7

8

A



## 4

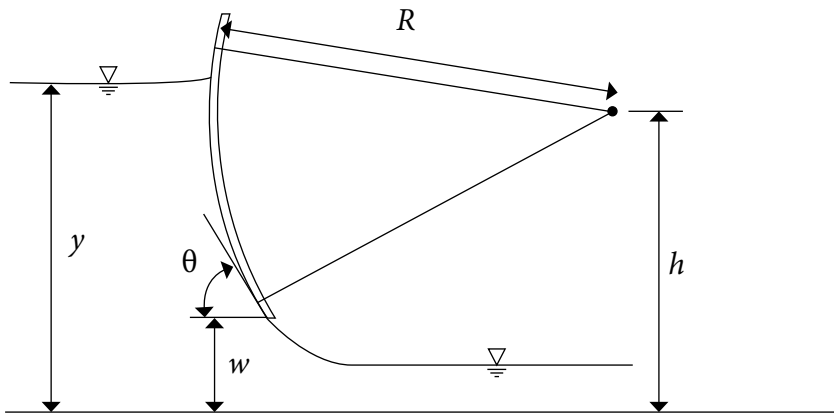
Capacidad de descarga  
con compuertas parcialmente  
abiertas

Las compuertas que están instaladas en cada canal de la estructura de control El Macayo sirven para regular y aforar el caudal que descarga cada canal, al fijar una abertura en ellas; para esto se dispone de modelos numéricos que relacionan el nivel de la superficie libre del agua que se tiene aguas arriba de las compuertas, con el caudal descargado para una abertura específica de las mismas; sin embargo, se sabe que existe incertidumbre en el uso de las fórmulas tradicionales para cuantificar el gasto que descarga una compuerta.

Entre las fórmulas disponibles en la literatura técnica destacan las presentadas por Henderson (1966) y Sotelo (1976); por ejemplo, Henderson recomienda emplear dichas expresiones en estudios preliminares, donde no se requiere gran aproximación; en Sotelo se discute la incertidumbre que hay en el cálculo de los coeficientes de contracción y descarga que se emplean en las correspondientes fórmulas. Además, en Jiménez y Bere-zowsky (2009) se presentan y comentan las diferencias que se obtienen al emplear cinco modelos numéricos para calcular el caudal que descarga una compuerta radial, y también con respecto a mediciones hechas en modelos físicos a escala (laboratorio); esto se debe principalmente a que las fórmulas publicadas fueron obtenidas con base en sendas mediciones de laboratorio para una sola compuerta, con un ancho  $b$ , radio  $R$  y altura  $h$  del perno (ver figura 4.1), en un canal rectangular, comúnmente con la arista a  $90^\circ$  del labio inferior de la compuerta y con la longitud necesaria para que las características del flujo que llega a la compuerta cumpla en

forma adecuada con la hipótesis de flujo unidimensional. Sin embargo, cuando se trata con compuertas instaladas en campo, es común la presencia de pilas entre compuertas, y que el funcionamiento hidráulico del canal que conduce el flujo hacia las compuertas influya en la capacidad de descarga de estas, además de la presencia del sello que se coloca en el labio inferior de las compuertas, para garantizar un cierre total al paso del flujo cuando se cierra totalmente la compuerta; todo esto, entre otros efectos, da lugar a que se tengan diferencias notables entre las leyes de descarga calculadas con los modelos numéricos disponibles.

Figura 4.1 Variables características de las compuertas radiales



Nuevamente, la posibilidad de disponer del modelo físico de la estructura de control permite tener la posibilidad de calibrar alguno de los modelos numéricos disponibles, como se hace en el estudio presentado en Jiménez y Berezowsky, para que el modelo numérico calibrado sea empleado en el cálculo del caudal que descargan las compuertas del prototipo, y que estas se utilicen como estructuras de aforo de manera confiable.

1

En este capítulo se presenta la calibración de las leyes de descarga de la estructura de control El Macayo; para ello se emplea un modelo numérico del tipo ley de potencia, propuesto por Bijankhan *et al.* (2013); la principal razón por la que se escogió este modelo se basa en la validez de su aplicación para diversas condiciones, lo cual ha sido comprobado con los excelentes resultados obtenidos, al compararlos con la extensa cantidad de mediciones hechas en laboratorio y campo.

2

3

#### 4.1 Modelo numérico

4

En Bijankhan *et al.* se presenta el estudio realizado para obtener una ecuación paramétrica, del tipo ley de potencia, útil para calcular el caudal que descarga una compuerta radial. En el estudio se emplean los conjuntos de mediciones que reporta Buyalski (1983), las bases de un estudio teórico presentado en Ferro (2000), y las adecuaciones hechas por Shakhrokhnia y Javan (2006) para compuertas radiales.

5

6

##### 4.1.1 Experimentos realizados por Buyalski (1983)

7

Al revisar las escasas publicaciones donde se reportan mediciones hechas en laboratorio de estudios de descarga en compuertas radiales, destacan las publicadas por Buyalski, quien realizó mediciones tanto para compuertas con descarga libre como sumergida. Los experimentos fueron realizados en un canal de sección rectangular, con ancho de plantilla de  $B = 0.762$  m, con una compuerta radial de ancho  $b = 0.711$  m y radio  $R = 0.702$  m; la diferencia del ancho  $B$  del canal con respecto al ancho  $b$  de la compuerta, se debe a que en el lado izquierdo del canal se colocó la mitad de una pila. Se utilizaron tres alturas  $h$  del perno de la compuerta,

8

A

1

con valores de 0.409, 0.461 y 0.511 m; también se emplearon dos diferentes tipos de sellos que se colocan en el labio inferior de la compuerta: goma dura, forma de nota musical y borde agudo (sin sello), los cuales se construyeron con escala 1:6, obteniendo así un total de nueve combinaciones de montaje, pues para cada tipo de sello se utilizaron las tres alturas de perno ya citadas.

2

3

#### 4.1.2 Contribución de Ferro (2000)

4

En Ferro se presenta el desarrollo de un estudio teórico-experimental, para obtener un modelo numérico adimensional que es útil para calcular la ley de descarga de una compuerta vertical plana; en particular, el modelo numérico se distingue porque primero se calcula el tirante crítico de una sección rectangular, en función de la abertura de la compuerta y del tirante aguas arriba de la misma; el modelo numérico corresponde a la expresión siguiente:

5

$$\frac{K}{w} = \alpha \left( \frac{y}{w} \right)^\beta \quad (4.1)$$

6

Donde:

7

$y$  Tirante aguas arriba de la compuerta, en m

$w$  Abertura de la compuerta, en m

$K$  Tirante crítico, en m

8

$\alpha$  y  $\beta$  Parámetros cuyos valores se obtienen por medio de experimentos en laboratorio

A

1

Lo novedoso de este modelo numérico es que la deducción de la ecuación 4.1 se basa en emplear la teoría del análisis dimensional para plantear una ecuación dimensional, a partir de la cual se llega a una expresión donde uno de sus términos se expresa como

2

$$K = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3}$$

3

Donde:

4

$q$  Caudal unitario por unidad de ancho, en  $(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$

$g$  Constante de la aceleración de la gravedad, en  $\text{m}/\text{s}^2$

5

Esta expresión también se emplea para calcular el tirante crítico en un canal cuya sección transversal es de forma rectangular, lo que permite llegar a definir el modelo numérico adimensional de la ecuación 4.1.

6

#### 4.1.3 Contribución de Shahrokhnia y Javan (2006)

7

Estos investigadores emplean un procedimiento similar al presentado en Ferro, para obtener con base en el análisis dimensional, un modelo numérico válido para calcular el gasto que descarga una compuerta del tipo radial. El modelo numérico propuesto es del mismo tipo que presenta Ferro y que corresponde a la ecuación 4.1.

8

La determinación de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , se obtienen con base en experimentos hechos en el laboratorio; para ello, Shahrokhnia y Javan (2006) emplearon los resultados experimentales reportados por Buyalski (1983),

A

para el conjunto de pruebas denominado por Buyalski (1983) como No. 7, el cual corresponde al caso de la compuerta radial con el labio inferior en forma aguda, sin sello y con la altura de perno de 0.409 m.

#### 4.1.4 Contribución de Bijankhan *et al.* (2013)

Bijankhan *et al.* (2013) emplearon el mismo enfoque teórico utilizado por Shahrokhnia y Javan, y por tanto, también por Ferro. Su trabajo se distingue porque obtienen una ecuación paramétrica del mismo tipo que las obtenidas por Ferro y Shahrokhnia y Javan, ecuación 4.1, donde los parámetros de la ley de potencia corresponden a cada uno de los nueve conjuntos de mediciones que realizó Buyalski.

Así, al sustituir la ecuación paramétrica en la expresión para calcular el tirante crítico de una sección rectangular, y despejar el caudal, se obtiene el modelo numérico siguiente:

$$Q = \sqrt{g} b \left[ \alpha w \left( \frac{y}{w} \right)^\beta \right]^{3/2} \quad (4.2)$$

Donde:

- $b$  Ancho de la compuerta, en m
- $w$  Abertura de la compuerta, en m
- $y$  Tirante aguas arriba de la compuerta, en m
- $g$  Aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$
- $Q$  Gasto descargado por la compuerta, en  $m^3/s$
- $\alpha$  y  $\beta$  Parámetros obtenidos con experimentos en el laboratorio

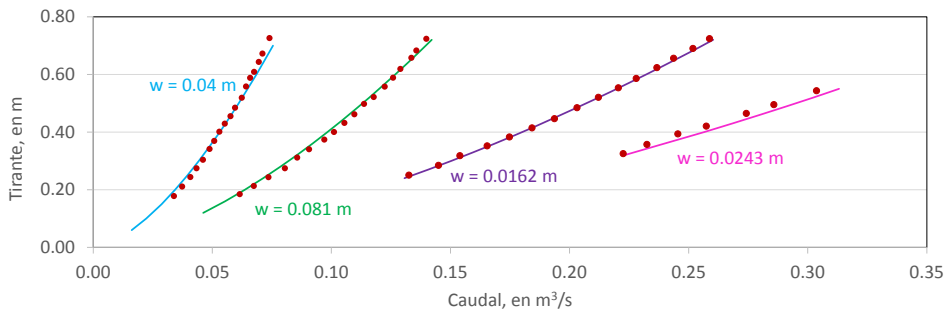
Los parámetros de la ecuación 4.2 están reportados en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Parámetros obtenidos por Bijankhan *et al.* (2013)

Prueba	Tipo de sello	$h$ , en m	$\alpha$	$\beta$
G – 1	Goma dura	0.409	0.8076	0.4341
G – 2	Goma dura	0.461	0.8006	0.4424
G – 3	Goma dura	0.511	0.7970	0.4302
G – 4	Nota musical	0.409	0.7858	0.4169
G – 5	Nota musical	0.461	0.7925	0.4158
G – 6	Nota musical	0.511	0.7902	0.4252
G – 7	Borde agudo	0.409	0.7908	0.4182
G – 8	Borde agudo	0.461	0.7954	0.4231
G – 9	Borde agudo	0.511	0.8004	0.4299

Como ejemplo, para mostrar la forma como el modelo de la ley de potencia de Bijankhan *et al.* representa los resultados experimentales reportados por Buyalski (1983), en la gráfica de la figura 4.2 se incluyen los valores medidos, correspondientes a la prueba G-7 y las leyes de descarga calculadas con la correspondiente ley de potencia, cuyos parámetros son  $\alpha = 0.7908$  y  $\beta = 0.4182$ .

**Figura 4.2** Comparación de la ecuación 4.2 con las mediciones de Buyalski (1983)



En la figura 4.2 se nota la excelente concordancia que hay entre los resultados obtenidos con la ley de potencia de Bijankhan *et al.* y los resultados experimentales reportados por Buyalski, para el conjunto de valores de la prueba G-7.

#### 4.1.5 Aplicación del modelo de Bijankhan *et al.* (2013)

El modelo numérico de Bijankhan *et al.*, ecuación 4.2, tiene los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  que dependen de la relación  $R/h$  y del tipo del sello de la compuerta; esto permite que, con base en las características de las compuertas de los canales de la estructura de control El Macayo, se obtengan los valores de los parámetros más adecuados, en función de los valores reportados en la tabla 4.1. Así, puesto que el labio inferior de las compuertas es del tipo agudo, se tiene que los parámetros están en función de los correspondientes a las pruebas G-7, G-8 y G-9, que están anotados en la tabla 4.1; además, con base en la relación  $R/h$  de las compuertas de ambos canales obtenemos:

Para el canal de la margen izquierda:

$$\frac{R}{h} = \frac{8.6 \text{ m}}{4.8 \text{ m}} = 1.79167$$

Para el canal de la margen derecha:

$$\frac{R}{h} = \frac{10.8 \text{ m}}{6.5 \text{ m}} = 1.6615$$



Estos resultados permiten deducir que los parámetros a determinar para el canal de la margen izquierda deben ser mayores que los reportados para el conjunto G-7 (ver tabla 4.2), por lo cual se deberán extrapolar; mientras que para el canal de la margen derecha, los parámetros deben estar entre los asociados a los de las pruebas G-7 y G-8 (ver tabla 4.2). Al realizar las operaciones aritméticas correspondientes se obtiene que:

Para el canal de la margen izquierda:  $\alpha = 0.7890$  y  $\beta = 0.4163$

Para el canal de la margen derecha:  $\alpha = 0.7921$  y  $\beta = 0.4196$

**Tabla 4.2** Coeficientes para el modelo de Bijankhan *et al.* (2013), con borde agudo

Prueba	$h$ , en m	$R$ , en m	$R/h$	$\alpha$	$\beta$
<b>G-MI</b>	<b>4.800</b>	<b>8.60</b>	<b>1.7917</b>	<b>0.7890</b>	<b>0.4163</b>
G-7	0.409	0.72	1.7164	0.7908	0.4182
<b>G-MD</b>	<b>6.500</b>	<b>10.80</b>	<b>1.6615</b>	<b>0.7921</b>	<b>0.4196</b>
G-8	0.461	0.72	1.5228	0.7954	0.4231
G-9	0.511	0.72	1.3738	0.8004	0.4299

Al sustituir los valores de los parámetros calculados que están anotados en los renglones G-MI y G-MD de la tabla 4.2, el modelo numérico queda expresado como:

Para el canal de la margen izquierda:

$$Q = \sqrt{g} b \left[ w 0.7890 \left( \frac{y_1}{w} \right)^{0.4163} \right]^{3/2} \quad (4.3)$$

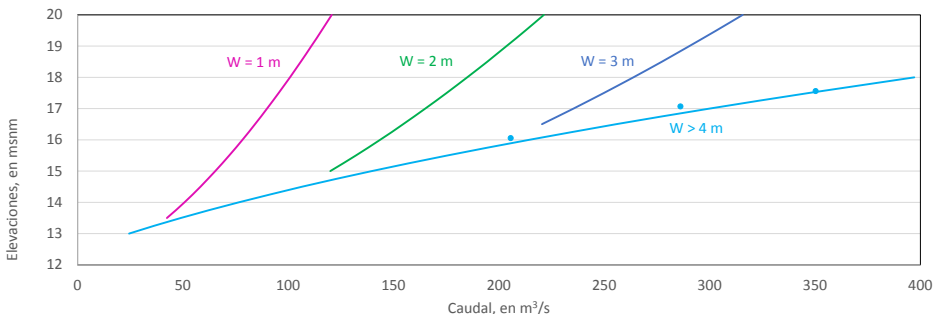
Para el canal de la margen derecha:

$$Q = \sqrt{g} b \left[ w 0.7921 \left( \frac{y_1}{w} \right)^{0.4196} \right]^{3/2} \quad (4.4)$$

Al emplear ambos modelos con los correspondientes datos de cada conjunto de compuertas se obtienen las leyes de descarga mostradas en las figuras 4.2a y 4.2b; se aclara que para el canal de la margen izquierda, se emplea un factor de tres al resultado obtenido con la ecuación 4.3, puesto que en ese canal se tienen tres compuertas; mientras que para el canal de la margen derecha se emplea un factor de cuatro en la ecuación 4.4, ya que en este otro canal se tienen cuatro compuertas.

Es conveniente aclarar que en Jiménez y Berezowsky, se presenta el estudio realizado para obtener las leyes de descarga de las compuertas del canal de la margen izquierda, donde se describe la calibración y verificación del modelo numérico deducido por Cozzo (1978). Esta experiencia permite recomendar la necesidad de verificar el modelo numérico de Bijankhan et al.; para ello, nuevamente se emplea el modelo físico de la estructura de control El Macayo, como se describe a continuación.

**Figura 4.3a** Curvas de descarga de las compuertas (CMI), sin calibrar



1

2

3

4

5

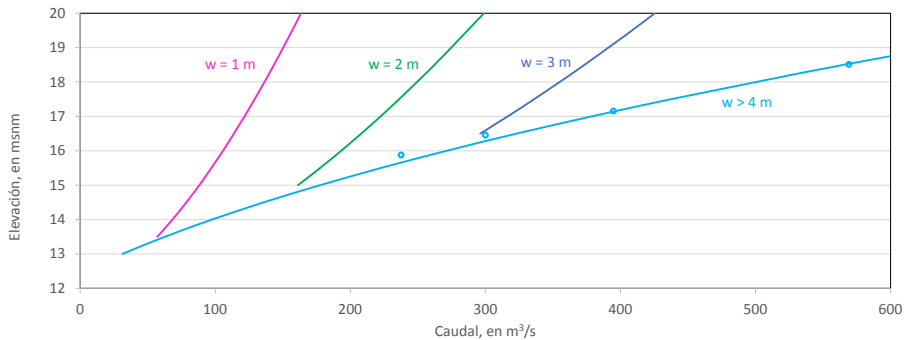
6

7

8

A

**Figura 4.3b** Curvas de descarga de las compuertas (CMD), sin calibrar



## 4.2 Estudio experimental

Las pruebas en el modelo físico de la estructura se realizaron de manera semejante a las realizadas para compuertas totalmente abiertas. Primero se clausuró uno de los canales por medio de un dique, para garantizar que todo el caudal que ingresaba al modelo físico pasara por el canal en estudio, con flujo en régimen permanente; una vez establecida la abertura de las compuertas se procedía a mantener un gasto constante de ingreso al modelo, y se realizaban lecturas de la superficie libre del agua en el punto de medición, hasta que el nivel del agua se mantuviera constante con el tiempo.

### 4.2.1 Sitio de medición de tirantes y abertura de compuertas

Al estar parcialmente abiertas las compuertas, se producen ondas estacionarias entre las pilas y fluctuaciones en la superficie libre del agua; estos disturbios se notan en la fotografía que se incluye en la figura 4.4; afortunadamente, estas características del flujo no llegan al sitio de medición,

el cual se localiza a 0.10 m de la nariz de la pila central de cada canal, donde se instaló un limnómetro de punta para medir la elevación de la superficie libre del agua y la cota de la plantilla del canal, cuya diferencia equivale al tirante en ese sitio, al cual se le denota en este trabajo como el tirante  $y_p$ . Con respecto a las ondas estacionarias, se observó que su ubicación dependía tanto del gasto como de la abertura.

La abertura de las compuertas se fijó por medio de prismas rectangulares de sección transversal cuadrada, cuya magnitud de sus lados,  $l$ , se calculó con la expresión siguiente:

$$l = \frac{w}{E_L} \quad (4.5)$$

Donde :

$E_L$  es la escala de longitudes del modelo,  $E_L = 60$ .

Figura 4.4 Sitio de medición del tirante  $y_p$  en el canal de la margen derecha



1

Para fijar la abertura de cada compuerta, primero se colocó el prisma sobre la plantilla del canal dentro del vano de cada compuerta, después se cerró la compuerta hasta hacer contacto con el prisma; finalmente, el elemento fue retirado cuidadosamente, deslizándolo sobre la plantilla para evitar que la abertura de la compuerta se modificara. En la figura 4.5 se muestra la forma de obtener la abertura en una de las compuertas. Para cada canal se realizaron seis pruebas; tres de ellas para una misma abertura en todo el conjunto de compuertas, y las otras tres para otra abertura de las compuertas.

2

3

4

#### 4.2.2 Pruebas en el canal de la margen izquierda

5

En las tablas 4.3 y 4.4 se reportan los gastos empleados en las pruebas realizadas con una abertura equivalente en prototipo a  $w = 2$  m y  $w = 3$  m, respectivamente. En la primera columna están anotados los caudales en el modelo, y en la otra las magnitudes en prototipo.

6

7

Para facilitar la relación de elevaciones entre el prototipo y el modelo físico, a la elevación de las plantillas de los canales del modelo físico, las cuales son horizontales, se les asignó la elevación de 0.20 m, puesto que en prototipo tienen la cota de 12 msnm, y la escala del modelo es 1:60; así, la elevación de la superficie libre del agua en el modelo se obtiene al hacer la suma del tirante  $y_p$  más la cota de la plantilla del canal,  $Z_p = 0.20$  m, cuyo resultado se denota como  $H_p$ .

8

A

1

2

3

4

5

6

7

8

A

**Figura 4.5**  
Determinación de la  
abertura de compuertas  
en el modelo físico



**Tabla 4.3** Caudales empleados con abertura equivalente en prototipo a  $w = 2$  m

$Q_M$ , en $m^3/s$	$Q_P$ , en $m^3/s$
0.00518	144.400
0.00525	146.409
0.00596	166.155
0.00600	167.416
0.00646	180.207
0.00660	184.106
0.00679	189.347
0.00712	198.636

1

**Tabla 4.4** Caudales empleados con abertura equivalente en prototipo a  $w = 3$  m

$Q_M$ , en $\text{m}^3/\text{s}$	$Q_P$ , en $\text{m}^3/\text{s}$
0.00831	231.595
0.00882	245.821
0.00939	261.793

2

3

En las tablas 4.5 y 4.6 se reportan las mediciones realizadas para las aberturas equivalentes en prototipo de  $w = 2$  m y  $w = 3$  m, respectivamente.

4

**Tabla 4.5** Mediciones para una abertura equivalente en prototipo de  $w = 2$  m

$Q_M$ , en $\text{m}^3/\text{s}$	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.00518	0.0699	0.2699
0.00525	0.0731	0.2731
0.00596	0.0900	0.2900
0.00600	0.0876	0.2876
0.00646	0.1019	0.3019
0.00660	0.1038	0.3038
0.00679	0.1057	0.3057
0.00712	0.1135	0.3135

5

6

7

**Tabla 4.6** Mediciones para una abertura equivalente en prototipo de  $w = 3$  m

$Q_M$ , en $\text{m}^3/\text{s}$	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.00831	0.0978	0.2978
0.00882	0.1044	0.3044
0.00939	0.1156	0.3156

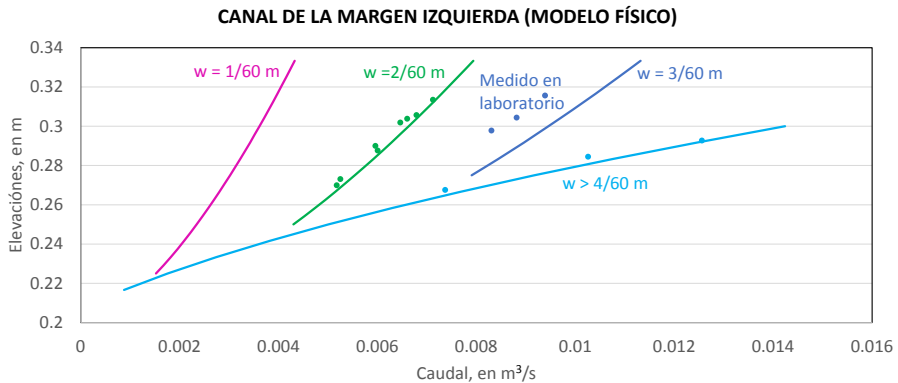
8

A

Es importante mencionar que no se realizaron pruebas de laboratorio para la abertura que corresponde en prototipo a  $w = 1$  m, debido a que las dimensiones del vertedor para aforar el gasto empleado no permite dar gastos tan pequeños como los requeridos para ese intervalo de caudales.

En la figura 4.6 se incluyen las leyes de descarga calculadas con la ley de potencia de Bijankhan *et al.*, para las aberturas de compuertas empleadas en modelo y los valores medidos en el modelo físico. Ahí se nota que los valores medidos en los experimentos presentan tendencias similares a los calculados; sin embargo, es evidente que las leyes de descarga de las compuertas en estudio se encuentran ligeramente desplazadas hacia el lado derecho; este comportamiento se debe principalmente a las características del flujo que llega a las compuertas.

**Figura 4.6** Leyes de descarga (sin calibrar) y mediciones obtenidas en el modelo físico





1

### 4.2.3 Pruebas en el canal de la margen derecha

2

En las tablas 4.7 y 4.8 se reportan los gastos empleados para las pruebas realizadas con una abertura equivalente en prototipo a  $w = 2$  m y  $w = 2.952$  m, respectivamente.

3

**Tabla 4.7** Caudales empleados para una abertura equivalente en prototipo a  $w = 2$  m

$Q_M$ , en $m^3/s$	$Q_P$ , en $m^3/s$
0.00670	186.830
0.00852	237.580
0.00924	257.6618

4

5

**Tabla 4.8** Caudales empleados para la abertura equivalente en prototipo a  $w = 2.952$  m

$Q_M$ , en $m^3/s$	$Q_P$ , en $m^3/s$
0.01103	307.58
0.01193	332.67
0.01262	351.92

6

7

En las tablas 4.9 y 4.10 se reportan las mediciones realizadas para las aberturas equivalentes en prototipo de  $w = 2$  m y  $w = 2.952$  m, respectivamente.

8

**Tabla 4.9** Mediciones para una abertura equivalente en prototipo de  $w = 2$  m

$Q_M$ , en $m^3/s$	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.00670	0.0740	0.2740
0.00852	0.1071	0.3071
0.00924	0.1236	0.3236

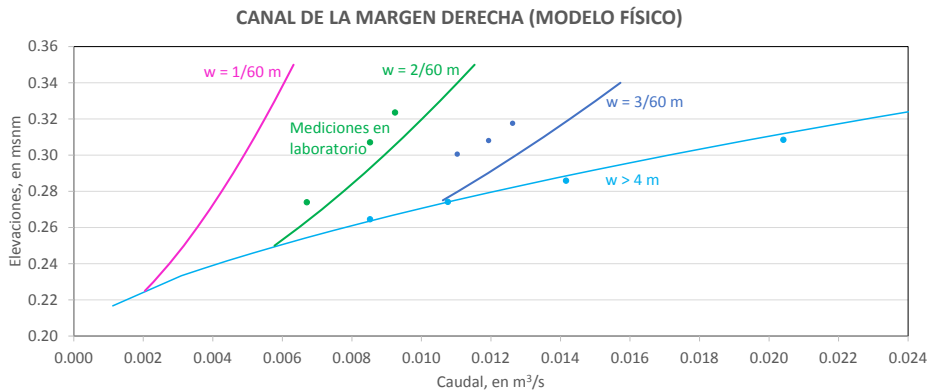
A

**Tabla 4.10** Mediciones para una abertura equivalente en prototipo de  $w = 2.952$  m

$Q_M$ , en $m^3/s$	$y_P$ , en m	$H_P$ , en m
0.01103	0.1006	0.3006
0.01193	0.1081	0.3081
0.01262	0.1163	0.3163

En la figura 4.7 se incluyen las leyes de descarga para las respectivas aberturas en el modelo, calculadas con la ley de potencia de Bijankhan, así como los valores medidos en el modelo físico. También ahí se observa que los datos experimentales obtenidos presentan tendencias similares a los calculados; sin embargo, es evidente que también en este caso, las leyes de descarga de las compuertas en estudio se encuentran desplazadas hacia el lado derecho de los valores medidos en el laboratorio.

**Figura 4.7** Leyes de descarga (sin calibrar) y valores medidos en el modelo físico



La comparación de los resultados mostrados en las figuras 4.6 y 4.7 indican la necesidad de calibrar el modelo numérico de Bijankhan, lo cual se describe a continuación.

1

## 4.3 Calibración del modelo numérico

2

Al observar las diferencias que hay entre los valores medidos y calculados que se muestran en las figuras 4.6 y 4.7, se nota que estas aumentan conforme se incrementa la abertura de las compuertas; por ello, es conveniente que en la función de calibración se incluya la abertura de la compuerta; además, es recomendable que la función de calibración sea sencilla y del tipo adimensional.

3

4

### 4.3.1 Canal de la margen izquierda

5

Es conveniente aclarar que en Jiménez y Berezowsky se presenta la calibración y verificación de la ley de descarga de las compuertas de este canal, donde se calibra la ecuación que dedujo Cozzo para obtener el coeficiente de descarga de una compuerta radial. Sin embargo, con el objetivo de mostrar procedimientos similares de calibración para diferentes modelos numéricos, a continuación se presenta la calibración y verificación del modelo propuesto por Bijankhan.

6

7

En la segunda, tercera y cuarta columnas de la tabla 4.11 se reportan las elevaciones, los tirantes y gastos medidos en el modelo físico, en la quinta columna el caudal calculado con la ecuación 4.6, y en la última, el cociente de caudal medido entre el gasto calculado.

8

$$Q_{MI} = 3 \sqrt{g} \frac{5}{60} \left[ w 0.789 \left( \frac{y_P}{w} \right)^{0.4163} \right]^{3/2} \quad (4.6)$$

A

Tabla 4.11 Valores empleados para la calibración del modelo

$w$ , en m	$H_p$ , en m (medido)	$y_p$ , en m (medido)	$Q_{MD}$ , en $m^3/s$ (medido)	$Q_{MD}$ , en $m^3/s$ (calculado)	$\frac{Q_{MD\ med}}{Q_{MD\ cal}}$
0.0333	0.0699	0.2699	0.00517832	0.00530311	0.9764697
0.0333	0.0731	0.2731	0.00525037	0.00545343	0.9627642
0.0333	0.0876	0.2876	0.00600370	0.00610581	0.9832764
0.0333	0.0900	0.2900	0.00595848	0.00620974	0.9595377
0.0333	0.1019	0.3019	0.00646240	0.00671044	0.9630363
0.0333	0.1038	0.3038	0.00660222	0.00678830	0.9725879
0.0333	0.1057	0.3057	0.00679016	0.00686563	0.9890088
0.0333	0.1135	0.3135	0.00712328	0.00717776	0.9924100
0.0500	0.0978	0.2978	0.00830522	0.00932804	0.8903499
0.0500	0.1044	0.3044	0.00881538	0.00971630	0.9072774
0.0500	0.1156	0.3156	0.00938815	0.01035469	0.9066563

Una manera de interpretar los resultados de la sexta columna consiste en notar que al emplear esos valores como factor en la ecuación 4.6, se obtendrían casi los mismos datos medidos de caudal; así, el valor medio de los factores para la abertura de  $w = 0.0333$  m es de 0.975; mientras que para la abertura de  $w = 0.05$  m, se tiene un valor medio de 0.901; al suponer que hay una función lineal que depende del cociente adimensional de  $w$  entre  $R$ , se plantea la expresión siguiente:

$$f = m \frac{w}{R} + b_f \quad (4.7)$$

1

Para obtener los parámetros  $m$  y  $b_f$  de la ecuación 4.7 se emplean las coordenadas siguientes:

$$\left( \frac{w}{R} = \frac{2}{8.6} = 0.2325, f = 0.975 \right); \left( \frac{w}{R} = \frac{3}{8.6} = 0.3488, f = 0.901 \right)$$

2

Los correspondientes parámetros de la ecuación 4.7 son  $m = -0.64$  y  $b_f = 1.12$ ; por tanto, la función de calibración queda expresada como

$$f = -0.64 \frac{w}{R} + 1.12 \quad (4.8)$$

4

Al emplear la función de calibración, ecuación 4.8, en la ecuación 4.6 se obtiene la ley de descarga de las compuertas del canal de la margen izquierda, la cual se expresa como sigue, donde  $R$  debe ser de 0.1433 m, puesto que se están empleando las dimensiones del modelo físico.

$$Q_{MI} = 3 \sqrt{g} \frac{5}{60} \left[ w 0.789 \left( \frac{y_P}{w} \right)^{0.4163} \right]^{3/2} \left[ -0.64 \frac{w}{R} + 1.12 \right] \quad (4.9)$$

5

6

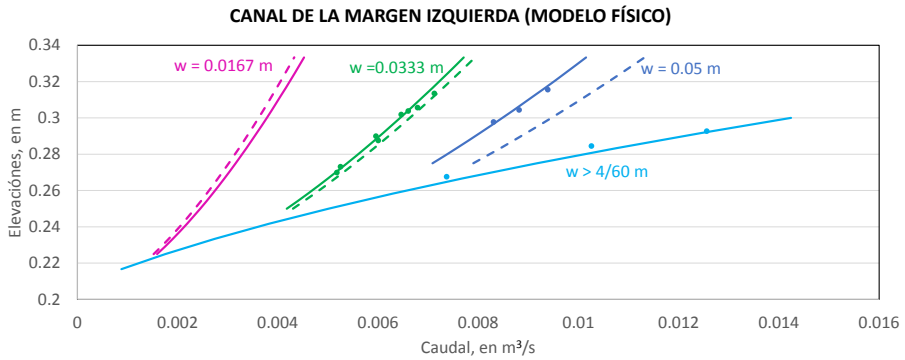
7

8

En la figura 4.8 se presentan las leyes de descarga calculadas para las aberturas de compuerta en el modelo físico de  $w = \{(1/60), (2/60), (3/60)\}$  en m, tanto con la expresión original de Bijankhan, con línea discontinua, como con la expresión calibrada, ecuación 4.9, con línea continua; también se incluyen los valores medidos en el laboratorio. Es conveniente hacer notar que para la abertura correspondiente a 1/60 m, para la misma elevación de la superficie libre del agua, el caudal calculado con la curva calibrada es mayor que la obtenida con el modelo original de Bijankhan; por ello, tal vez sea conveniente, en este caso particular, emplear el modelo numérico propuesto en Jiménez y Berezowsky.

A

Figura 4.8 Leyes de descarga de compuertas, calibradas con mediciones de laboratorio



### 4.3.2 Canal de la margen derecha

La calibración de la ley de descarga para este canal se realiza de manera similar al de la margen izquierda; así, en la tabla 4.12 están anotados en la segunda, tercera y cuarta columnas las elevaciones, los tirantes y gastos medidos en el modelo físico; en la quinta columna el caudal calculado con la ecuación 4.10; y en la última, el cociente de caudal medido entre el gasto calculado.

$$Q = 4 \sqrt{g} b \left[ w 0.7921 \left( \frac{y_P}{w} \right)^{0.4196} \right]^{3/2} \quad (4.10)$$

Tabla 4.12 Valores empleados para la calibración del modelo

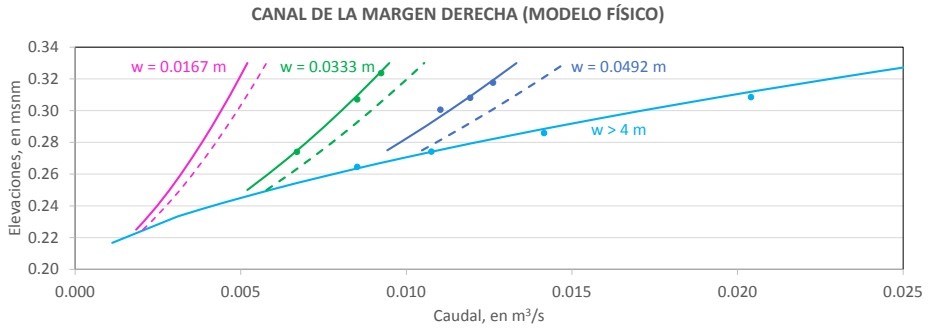
$w$ , en m	$H_p$ , en m (medido)	$y_p$ , en m (medido)	$Q_{MD}$ , en $m^3/s$ (medido)	$Q_{MD}$ , en $m^3/s$ (calculado)	$\frac{Q_{MD\ med}}{Q_{MD\ cal}}$
0.0333	0.074	0.274	0.0067	0.00739939	0.9054
0.0333	0.1071	0.3071	0.00852	0.00933794	0.9124
0.0333	0.1236	0.3236	0.00924	0.01021922	0.9041
0.0492	0.1006	0.3006	0.01103	0.01259921	0.8754
0.0492	0.1081	0.3081	0.01193	0.01318251	0.9049
0.0492	0.1176	0.3176	0.01262	0.01390025	0.9078

Los valores reportados en la sexta columna de la tabla 4.12 permiten notar que en este caso, el valor medio es de 0.90, de donde se deduce que al emplear un factor de  $f = 0.90$  en la ecuación 4.10, se obtendrían valores calculados que son bastante aproximados a los caudales medidos en el modelo físico; por tanto, el modelo numérico calibrado para el canal de la margen derecha se expresa de la manera siguiente:

$$Q = 4 \sqrt{g} b \left[ w 0.7921 \left( \frac{y_p}{w} \right)^{0.4196} \right]^{3/2} \quad (4.11) \quad (0.9)$$

Nuevamente, en la figura 4.9 se presentan las leyes de descarga calculadas para las aberturas de compuerta en el modelo físico de  $w = \{0.0167, 0.0333, 0.0492\}$ , en m, tanto con la expresión original de Bijankhan, con línea discontinua, como con la expresión calibrada, ecuación 4.11, con línea continua; también se incluyen los valores medidos en el laboratorio.

Figura 4.9 Leyes de descarga calibradas con mediciones de laboratorio



#### 4.4 Leyes de descarga de los canales de la estructura de control El Macayo

A continuación se presentan los modelos numéricos de las leyes de descarga de las compuertas que se deben emplear en los prototipos.

##### 4.4.1 Ley de descarga del canal de la margen izquierda

El modelo numérico calibrado que se emplea con las dimensiones del prototipo es el siguiente:

$$Q_{MI} = 15 \sqrt{g} \left[ w 0.7885 \left( \frac{H_p - 12}{w} \right)^{0.4152} \right]^{3/2} \left( 1.12 - 0.64 \frac{w}{8.6} \right) \quad (4.12)$$

El factor 15 toma en cuenta que se tienen tres compuertas de 5 m de ancho cada una, mientras que a la elevación de la superficie libre del agua, denotada como  $H_p$ , se le resta la elevación de la plantilla del canal, que es  $Z_p = 12$  msnm, para obtener el tirante  $y_p$  en el prototipo. Se recuerda que las compuertas de este canal tienen radio igual a  $R = 8.60$  m.

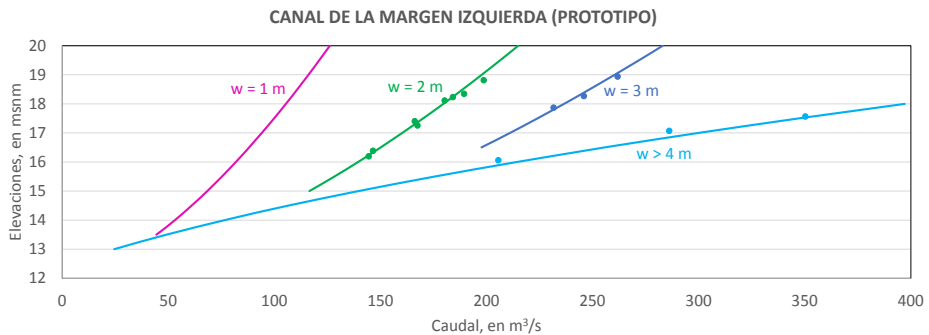


El modelo numérico dado por la ecuación 4.12 es válido cuando se operan todas las compuertas abiertas de manera simultánea, con la misma abertura . Para su correcta aplicación se debe cumplir con la condición siguiente:

$$H_p \geq 12 + 1.5 w \tag{4.13}$$

En la figura 4.10 se presentan las llamadas curvas de descarga de las compuertas para las aberturas de compuerta de 1, 2 y 3 m; también se incluyen los correspondientes valores medidos en el modelo, los cuales se han escalado a magnitudes del prototipo.

Figura 4.10 Curvas calibradas de las leyes de descarga de las compuertas



#### 4.4.2 Ley de descarga del canal de la margen derecha

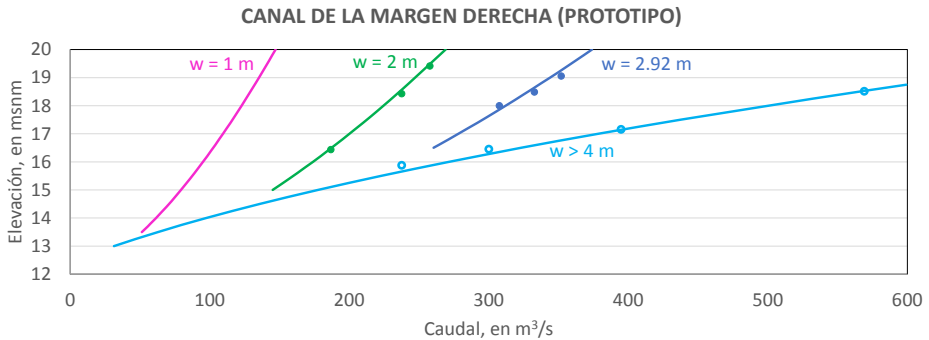
El modelo numérico calibrado para este canal se basa en la ecuación 4.11, el cual se expresa como

$$Q = 20 \sqrt{g} \left[ w 0.7921 \left( \frac{H_p - 12}{w} \right)^{0.4196} \right]^{3/2} \tag{4.14}$$

En este caso, con el factor 20 se toma en cuenta que en el canal se tienen cuatro compuertas de 5 m de ancho; esta expresión también tiene la misma restricción dada por la desigualdad 4.13, puesto que ambos canales tienen plantilla horizontal a la cota 12 msnm.

En la figura 4.11 se presentan las curvas elevaciones-gastos obtenidas para las aberturas de compuerta de 1, 2 y 2.92 m, a partir de la ecuación 4.14, que es el modelo numérico calibrado; además, están incluidas las mediciones realizadas en el modelo físico, cuyos valores se han escalado a las magnitudes del prototipo.

**Figura 4.11** Curvas calibradas de las leyes de descarga de las compuertas



# 5 Conclusiones y recomendaciones

---

Se dispone de cuatro sencillos modelos numéricos que definen las leyes de descarga de la estructura de control El Macayo; dos de ellos corresponden a sendos canales con compuertas totalmente abiertas, y los otros dos cuando se utilizan las compuertas parcialmente abiertas.

Con respecto al funcionamiento hidráulico de los canales con las compuertas totalmente abiertas, el cálculo del efecto de remanso por la presencia de las pilas se hizo con la ecuación de la energía y el modelo numérico propuesto por Hinds, cuya expresión permite considerar que las pilas producen un efecto de contracción en el flujo. Con base en una parte de todo el estudio experimental se determinó que el coeficiente de la fórmula de Hinds, es de 0.50 para el tipo, forma y dimensiones de las pilas que se tienen, cuyo valor coincide con el que se emplea de manera estándar en contracciones bruscas en canales.

En cuanto a las leyes de descarga que corresponden a las compuertas parcialmente abiertas, el modelo numérico propuesto por Bijankhan es una excelente alternativa de cálculo, puesto que es sencillo de calibrar y compete con la fórmula tradicional empleada para calcular el gasto que descarga una compuerta radial, donde el coeficiente de descarga se obtiene con la expresión deducida por Cozzo, lo cual se demuestra en Jiménez y Berezowsky. Sin embargo, el hecho de que en el modelo numérico propuesto por Bijankhan se incluya el efecto del tipo de sello en el labio inferior de la compuerta y la altura del perno, da lugar a que este nuevo modelo sea más recomendable de emplear.

1

Los modelos numéricos que definen las leyes de descarga de la estructura de control El Macayo están calibrados y verificados con mediciones hechas en el laboratorio, en un modelo físico de toda la estructura, cuya escala es 1:60. Los cuatro modelos numéricos están en función de la elevación de la superficie libre del agua, denotada en este trabajo como  $H_p$ , la cual se localiza a unos cuantos metros aguas arriba de la nariz de cada conjunto de pilas, donde se dispone de escalas dibujadas en la pared de cada canal prototipo, lo que permite que las leyes de descarga calibradas en este trabajo se utilicen de manera directa con datos de campo; así, es posible emplear la estructura de control para aforar el caudal que se descarga hacia el río Carrizal de manera confiable.

2

3

4

5

Otra utilidad de las leyes de descarga que se obtienen en este trabajo es que permiten definir una de las condiciones de frontera del sistema hidráulico, formado por los ríos Mezcalapa – Samaria – Carrizal.

6

7

En particular, se sabe que el tramo del río Carrizal que está comprendido entre la bifurcación y la estructura de control tiende a azolverse; para hacer estudios de alternativas que permitan mejorar el funcionamiento hidráulico de este tramo, se requiere conocer de manera adecuada la capacidad de descarga de la estructura, la cual queda definida con las leyes de descarga obtenidas en este trabajo.

8

Es indispensable hacer notar la importancia que tiene el hecho de disponer del modelo físico de la estructura de control El Macayo, para calibrar y verificar los modelos numéricos que se obtienen en el presente trabajo.

A

## 6

## RECONOCIMIENTOS

La colaboración de la Ing. Karina Millán Campuzano, quien es becaria del Instituto de Ingeniería, fue de gran ayuda en la elaboración del presente trabajo, principalmente durante las etapas de medición en el laboratorio, y también en los cálculos para la calibración y verificación de los modelos numéricos que se presentan en este trabajo.

El M. en I. Víctor Manuel Ortiz Martínez, colaboró en las etapas del estudio experimental.

El apoyo de las Licenciadas Guillermina Sánchez y Elizabeth Plata, de la Unidad de Servicios de Información, del Instituto de Ingeniería, UNAM, ha sido fundamental para conseguir una parte del material que se incluye en las referencias, cuya consulta ha permitido enriquecer este trabajo académico.

En la sección de dibujo del Instituto de Ingeniería se elaboraron los esquemas de las figuras que se incluyen en el presente trabajo.

## 7

## TESTIMONIO DE GRATITUD

El estudio experimental desarrollado en el modelo físico de la estructura de control El Macayo, ha sido fundamental para realizar la calibración de los modelos numéricos con los que se calcula el caudal que descarga la estructura de control; esta importante etapa del presente trabajo de investigación se realizó con el apoyo del M. en I. Alejandro Sánchez Huerta, Subdirector de hidráulica, y del Dr. Adrián Pedroza Acuña, Coordinador de hidráulica, ambos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se reconoce y agradece las facilidades otorgadas para emplear la correspondiente infraestructura.

Agradezco a la Dra. Rosío Ruiz Urbano, jefa del departamento de hidráulica, quien después de revisar el presente escrito, me recomendó hacer la publicación de este trabajo.

## 8

## REFERENCIAS

- BIJANKHAN, M., Ferro, V. y Kouchakzadeh, S. (2013). New stage – discharge relationships for radial gates, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 139(5).
- BUYALSKI, C. P. (1983). Discharge algoritms for canal radial gates, REC-ERC-83-9, *Engineering and Research Center. U. S. Bureau of Reclamation*, Denver.
- COZZO, G. (1978). Una formula per il calcolo del coeficiente d'efflusso delle luci sotto paratoie, *L' Energia Elettrica*, 11(12).
- FERRO, V. (2000). Simultaneous flow over and under gate, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 126(3).
- HENDERSON, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Mac Millan, New York.
- HINDS, J. (1928). The hydraulic design of flume and syphon transition, *Transactions*, ASCE, Vol. 92.
- JAIN, S. C. (2001). *Open - channel flow*, John Wiley & Sons, INC. USA.
- JIMÉNEZ, A. A. y Berezowsky, M. (2009). Modelación matemática de la operación de la estructura de control del río Carrizal, *Serie Investigación y Desarrollo, SID/662*, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- JIMÉNEZ, A. A., Millán, K. y Ortíz, V. M. (2014). Leyes de descarga de la estructura de control El Macayo, Tabasco, *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, AMH*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- REHBOCK, T. (1929). Discussion of precise weir measurements, *Transactions*, ASCE, No. 93.

1

SHAHROKNIA, M. y Javan, M. (2006). Dimensionless stage-discharge relationship in radial gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 132(2).

2

SOTELO, A. G. (1976). *Hidráulica General. Fundamentos*, Limusa, México.

YARNELL, D. L. (1934a). Pile trestles as channel obstructions, *U. S. Department of Agriculture*, Technical Boletín, No. 429.

3

YARNELL, D. L. (1934b). Pile trestles as channel obstructions, *U. S. Department of Agriculture*, Technical Boletín, No. 442.

4

5

6

7

8

A



## APÉNDICE. MÉTODO DE PASO ESTÁNDAR

---

El método consiste básicamente en plantear la ecuación de la energía entre dos secciones transversales que están separadas una distancia,  $\Delta X_j$ , la cual es conocida; para una de estas dos secciones se conoce el tirante o la elevación de la superficie libre del agua (SLA); además se conoce la forma y dimensiones de ambas secciones transversales y también el coeficiente de rugosidad de Manning.

Conocido el tirante o la cota de la SLA en una sección, se calculan los elementos geométricos, es decir: el área hidráulica  $A$ ; el perímetro mojado  $P$ ; el radio hidráulico  $R_h$ ; y el ancho de superficie libre  $T$ ; además, al hacer el cociente del caudal y el área hidráulica se obtiene la llamada velocidad media  $V$ , del flujo considerado como unidimensional.

Una de las condiciones para emplear este método indica que la línea que define el perfil hidráulico por calcular, entre las dos secciones, debe ser continua y cambiar de manera gradual a lo largo del tramo de longitud  $\Delta X$ . También debe ser posible calcular las pérdidas de energía que existen entre las secciones seleccionadas. Una de esas pérdidas se debe a la fricción que hay entre el flujo y las paredes del canal; mientras que la otra, conocida como pérdida local, ocurre donde hay cambios graduales o bruscos de la forma y/o dimensiones de la sección transversal; en el caso de canales naturales esta pérdida ocurre de manera continua.

1

Al sustituir los elementos geométricos conocidos en una de las secciones en la ecuación de la energía, se obtiene una ecuación no lineal del tipo implícito, en función del tirante o de la elevación de la SLA en la sección transversal, ubicada a una distancia  $\Delta X$ . Al resolverla se obtiene ese tirante o la elevación de la SLA.

2

3

En el caso particular de los canales en la estructura El Macayo, la sección donde se conoce el tirante se asocia con el cadenamiento  $X_{j+1}$ , mientras que la sección donde se desea calcular el tirante se identifica como  $X_j$ , ver figura A.1; se recuerda que el flujo está en régimen subcrítico, por lo que el cálculo se hace desde aguas abajo hacia aguas arriba.

4

En un canal con plantilla horizontal, la ecuación de la energía se expresa como

5

$$H_j + \frac{V_j^2}{2g} = H_{j+1} + \frac{V_{j+1}^2}{2g} + h_{ff} + h_{ij} \quad (\text{A.1})$$

6

Donde:

7

$H$  Es la elevación de la superficie libre del agua, en la sección  $j$  o en la  $j + 1$ , con respecto a un plano horizontal de referencia; se recomienda que dicho plano sea el nivel medio del mar, en msnm

8

$V$  Velocidad media del flujo, en la sección  $j$  o la  $j + 1$ , en m/s

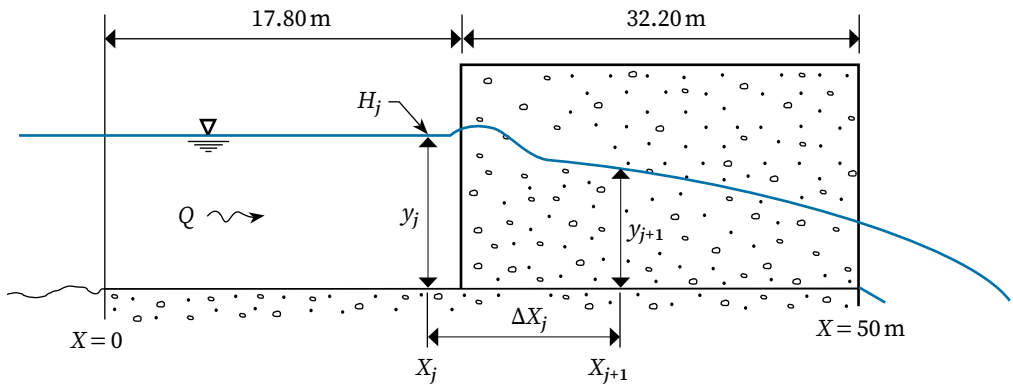
$g$  Constante de la aceleración de la gravedad,  $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$

$h_{ff}$  Pérdida de energía debida a la fricción que ocurre en el tramo con longitud  $\Delta X_j$ , en m

$h_{ij}$  Pérdida de energía local debida a una transición, tanto del tipo gradual como brusca, que esté en el tramo de longitud  $\Delta X_j$ , en m

A

Figura A.1 Secciones transversales empleadas en el cálculo de pérdida local



Se aclara que es común aceptar que el coeficiente de Coriolis, empleado en la ecuación de la energía, para tomar en cuenta que el cálculo de la energía cinética se hace con la velocidad media en lugar de usar la distribución de velocidades, es igual a la unidad, por lo que se ha omitido su presencia en la ecuación A.1.

La pérdida por fricción que ocurre en el tramo comprendido por las secciones  $j$  y  $j+1$  es comúnmente calculada con el producto del promedio aritmético de las pendientes de fricción en sendas secciones por la distancia que hay entre ellas; así, esta pérdida se expresa como:

$$h_{fj} = \Delta X_j \frac{(S_{fj} + S_{fj+1})}{2} \quad (\text{A.2})$$

Donde para cualquier sección  $j$ , la pendiente de fricción se calcula con base en una fórmula de flujo uniforme, comúnmente la de Manning; así se tiene:

$$S_{fj} = \left( \frac{V_j n}{R_{hj}^{2/3}} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

En un canal de plantilla horizontal o de pendiente pequeña, para cualquier sección  $j$ , la elevación de la superficie libre del agua, denotada como  $H_j$ , con respecto al plano horizontal de referencia, es:

$$H_j = Z_j + y_j \quad (\text{A.4})$$

Otra pérdida de energía a presentarse en los canales es la debida a transiciones, tanto graduales como bruscas; este tipo de pérdida se denota como  $h_{ij}$  en la ecuación de la energía. Una de las expresiones para su cálculo es la propuesta por Hinds. En particular, la pérdida de energía local en una contracción se expresa como:

$$h_{ij} = C_0 \left[ \frac{V_{j+1}^2}{2g} - \frac{V_j^2}{2g} \right] \quad (\text{A.5})$$

Donde el coeficiente  $C_0$  depende del tipo de contracción. Al sustituir las ecuaciones A.2 y A.5; en la ecuación A.1 se obtiene:

$$F(H_j) = H_j + (1 + C_0) \frac{V_j^2}{2g} + \frac{\Delta X_j}{2} \left( \frac{V_j n}{R_{hj}^{2/3}} \right)^2 - ED = 0 \quad (\text{A.6a})$$

Donde en el término  $ED$  están las variables conocidas en la sección  $X_{j+1}$ , es decir:

$$ED = H_{j+1} + (1 + C_0) \frac{V_{j+1}^2}{2g} + \frac{\Delta X_j}{2} \left( \frac{V_{j+1} n}{R_{hj+1}^{2/3}} \right)^2 \quad (\text{A.6b})$$

Al sustituir la ecuación A.4 en las ecuaciones A.6, se obtiene una ecuación no lineal e implícita, cuya incógnita es el tirante  $y_j$ . Así, la ecuación de la energía para el cálculo entre dos secciones localizadas dentro de los canales de la estructura El Macayo, aguas arriba del punto de tangencia  $PT$ , se expresa como:

$$F(y_j) = Z_j + y_j + (1 + C_0) \frac{Q^2}{2g A_j^2} - \frac{\Delta X_j}{2} \left( \frac{Qn}{A_j R_{hj}^{2/3}} \right)^2 - EDY = 0 \quad (\text{A.7a})$$

Donde  $EDY$  es una constante que se obtiene de sustituir todo los datos de la sección  $X_{j+1}$ , cuyo valor se calcula como:

$$EDY = Z_{j+1} + y_{j+1} + (1 + C_0) \frac{Q^2}{2g A_{j+1}^2} + \frac{\Delta X_j}{2} \left( \frac{Qn}{A_{j+1} R_{hj+1}^{2/3}} \right)^2 \quad (\text{A.7b})$$

En la actualidad se dispone de varias alternativas para resolver la ecuación A.7a; una de ellas consiste en recurrir a un método numérico; tradicionalmente el más empleado es el método de Newton-Raphson, que se basa en emplear de manera recursiva la expresión siguiente:

$$y_j^{i+1} = y_j^i - \frac{F(y_j^i)}{F'(y_j^i)} \quad (\text{A.8})$$

Donde

$$F'(y_j^i) = 1 - (1 + C_0) F_{rj}^2 + \Delta X_j S_{ff} \left( \frac{5T_j - 4R_{hj}}{3A_j} \right) \quad (\text{A.9})$$

Y  $F_{rj}^2$  es el cuadrado del número de Froude, en la sección  $j$ .

1

Este método numérico, del tipo recursivo, se distingue por su rapidez de convergencia. El criterio de convergencia se basa en revisar la condición siguiente:

$$|y_j^{i+1} - y_j^i| \leq 0.001 \text{ m} \quad (\text{A.10})$$

2

3

Actualmente se dispone de otras herramientas para resolver ecuaciones no lineales del tipo A.7; una de ellas es la función objetivo incluida en el paquete de EXCEL; o bien, emplear paquetes que permiten resolver esta clase de ecuaciones como MAPPLE, MATLAB, etc.

4

5

Además, existen modelos matemáticos, como el HEC-RAS, desarrollado por el cuerpo de la armada de los EUA, que ha sido probado y es ampliamente recomendado para el cálculo de perfiles hidráulicos en canales artificiales y naturales. Sin embargo, debido a las particularidades de los canales que se estudian en este trabajo, se consideró preferible utilizar un modelo matemático desarrollado en lenguaje Fortran Estándar, para hacer el cálculo de los perfiles hidráulicos.

6

7

8

A

1

2

3

4

5

6

7

8

A



*Calibración y verificación de las leyes  
de descarga de una estructura de control*

se publicó la primera edición electrónica de un ejemplar (3 MB) en formato PDF el 2 de marzo de 2023, en el repositorio de la Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México. C.P. 04510

El diseño estuvo a cargo de la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería. Las familias tipográficas utilizadas fueron Source Serif Pro para texto y Brevia para títulos, ambas con sus respectivas variantes.