

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°7: Análisis de Una Compuerta de Descarga Libre, Plana y Vertical

Fuente del recurso: Ejemplo adaptado del libro Hidráulica de Canales (Villón, 1995), por el estudiante UIS Eliel David Malaver Nieto, en el desarrollo de su trabajo de grado

1. Objetivos de la simulación

- ✓ Comprender los conceptos de las compuertas de admisión inferior en canales abiertos, mediante la implementación de una simulación en la herramienta computacional H-Canales
- ✓ Aplicar los conceptos adquiridos sobre las compuertas de admisión inferior, mediante el desarrollo de un ejemplo orientador utilizando el programa HEC-RAS
- ✓ Evaluar y fortalecer la comprensión de los conceptos de las compuertas de admisión inferior en canales abiertos, a través de la resolución de preguntas orientadoras que involucren la aplicación de los conocimientos teóricos en situaciones prácticas simuladas con la herramienta H-Canales

2. Requerimientos para la simulación

- ✓ Sistema operativo Windows
- ✓ Seguir el manual de instrucciones para descargar e instalar el programa H-Canales
- ✓ Preferiblemente poseer la versión 3 del programa H-Canales

3. Introducción

El flujo en los canales de alguna manera debe ser regulado o controlado, ya sea con propósitos económicos como por ejemplo el racionamiento del agua o por labores de mantenimiento en los canales, a estas estructuras se les denomina estructuras hidráulicas. La compuerta de admisión inferior es una estructura hidráulica que consiste en placas móviles planas o curvas, que modifican el flujo natural del agua y permiten a través de una brecha debajo de ellas, el paso del flujo.

Las compuertas de admisión inferior significan principalmente, que el control o afectación del flujo se realiza modificando la abertura entre el fondo del canal y el borde inferior de la lámina que constituye la compuerta, esto mediante el izado o descenso de la compuerta.

Las compuertas de admisión inferior constituyen en un obstáculo para el flujo, y, por lo tanto, ocasionan un estancamiento del flujo aguas arriba de la compuerta, lo que implica que la fuerza del flujo ejerza presión sobre la compuerta y también, sobre las paredes del canal. Además de esto, la presencia de una compuerta en un canal causará que las condiciones hidráulicas del flujo tanto aguas arriba como aguas abajo, se vean alteradas.

Para esta simulación se llevará a cabo un ejercicio en el cual se calculará el valor del caudal que fluye por debajo de una compuerta de admisión, esto se desarrollará con el programa H-Canales, teniendo en cuenta aspectos teóricos que van de la mano con esta simulación. El propósito de este trabajo es el de generar en el estudiante las nociones iniciales, para comenzar a estudiar las estructuras hidráulicas, más exactamente, la compuerta de admisión inferior, en descarga libre, de forma plana y ubicación vertical.

4. Marco teórico

4.1 Compuerta de admisión

Una compuerta es una placa móvil, plana o curva, que, al levantarse, forma un orificio entre su borde inferior y la estructura hidráulica (presa, canal, etc.) y a la vez, controla el caudal presente en el flujo. Las compuertas se utilizan para la regulación de caudales y como emergencia y cierre para mantenimiento de otras estructuras (Marbello, 2005). El orificio generalmente se hace entre el fondo del canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal. El flujo en un canal cuando se coloca una compuerta por lo general es normal a ella (Villón, 1995). En la *Figura 1* se muestran algunos ejemplos de los tipos de compuertas y el comportamiento del flujo.

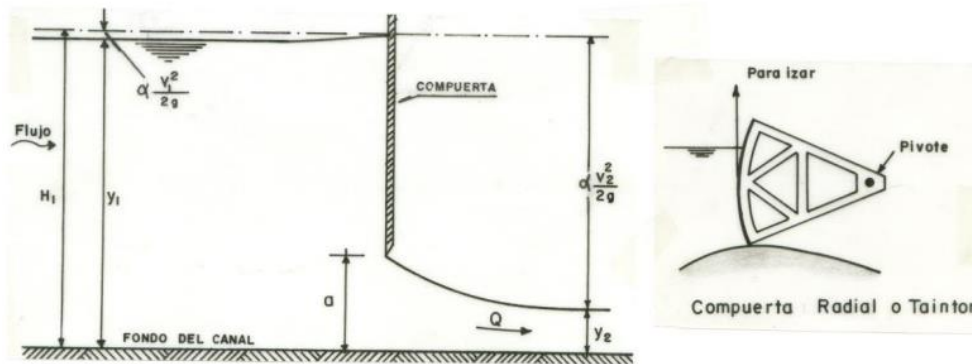


Figura 1 Flujo a través de una compuerta plana y una compuerta radial (Marbello, 2005)

4.2 Clasificación de las compuertas

Las condiciones físicas, hidráulicas, climáticas y de operación, evaluadas apropiadamente, imponen la selección del tipo y tamaño adecuado de las compuertas. Éstas se diseñan con diferentes tipos y variadas características en su operación y en su mecanismo de izado, los cuales permiten clasificarlas en grupos generales, de la siguiente manera (Marbello, 2005):

✓ Según las condiciones del flujo aguas abajo

En la *Figura 2*, se muestra una representación de la clasificación de las compuertas teniendo en cuenta la condición del flujo aguas abajo, y según esta condición, las compuertas se clasifican así:

- **Compuertas de descarga libre:** Se dice que una compuerta de descarga es libre, cuando el flujo supercrítico saliente de la parte inferior de la compuerta está abierto a la atmósfera y no está cubierto o sumergido en agua. Como se muestra en la *Figura 2*, en la imagen de la izquierda.
- **Compuertas con descarga sumergida o ahogada:** Se dice que una compuerta de descarga es sumergida, cuando la altura y_3 que es producida por un control hidráulico aguas abajo y se muestra en la *Figura 2*, se acerca tanto a la compuerta que ahoga la salida del flujo por la abertura de la

compuerta ocasionando variaciones en las condiciones del flujo saliente por la compuerta y en las condiciones del flujo aguas arriba de esta.

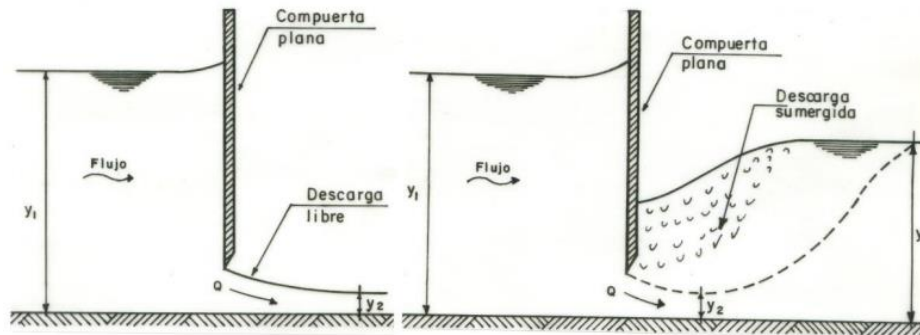


Figura 2 Tipos de descargas en compuertas (Marbello, 2005)

✓ **Según el tipo de operación y funcionamiento**

- Compuertas principales:
 - de regulación
 - de guarda o cierre
- Compuertas de emergencia

✓ **De acuerdo con sus características geométricas**

- Compuertas planas:
 - Rectangulares
 - Cuadradas
 - Circulares
 - Triangulares, etc.
- Compuertas curvas o alabeadas:
 - Radiales
 - Tambor
 - Cilíndricas

✓ **Según el mecanismo de izado:**

- Compuertas deslizantes
- Compuertas rodantes

4.3 Ecuaciones para el flujo a través de compuertas planas

Para deducir una expresión que permita determinar el caudal del flujo a través de una compuerta plana, considérese el caso más general de una compuerta plana, inclinada un ángulo θ respecto a la horizontal, y ancho B igual al ancho del canal como se muestra en la *Figura 3* (Marbello, 2005).

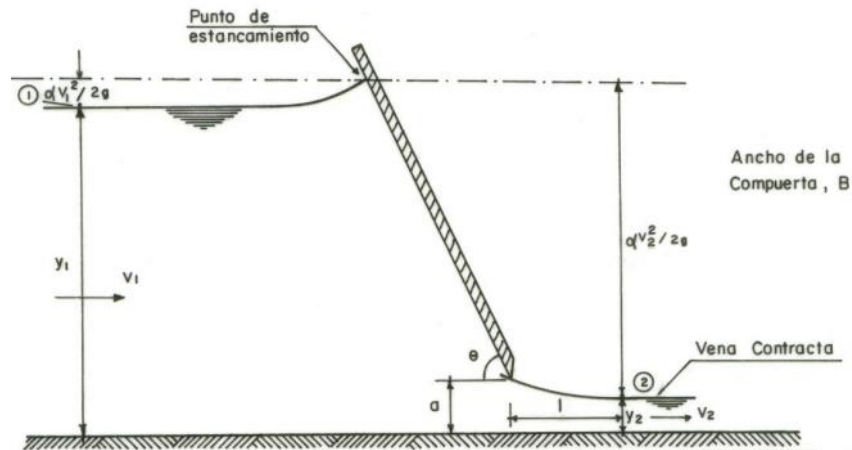


Figura 3 Flujo a través de una compuerta plana inclinada (Marbello, 2005)

El flujo a través del orificio formado entre el labio inferior de la compuerta y el fondo del canal puede considerarse bidimensional. Nótese que la descarga supercrítica bajo la compuerta reduce progresivamente su profundidad a lo largo de una corta distancia, l , aguas abajo, hasta una sección en donde la contracción del chorro es completa, llamada **vena contracta** (Marbello, 2005).

La profundidad del flujo en la vena contracta, y_2 , se relaciona con la abertura, a , por medio del coeficiente de **contracción**, C_c , así:

$$C_c = \frac{y_2}{a} \quad (1)$$

De donde:

$$y_2 = aC_c \quad (2)$$

Para compuertas verticales se ha comprobado que:

$$l = \frac{a}{C_c} \quad (3)$$

Reemplazando en la primera ecuación se tiene:

$$l = \frac{a}{\frac{y_2}{a}} = \frac{a^2}{y_2} \quad (4)$$

Aceptando las hipótesis de fluido incompresible, flujo permanente y uniforme, distribución hidrostática de presiones lejos de la compuerta, y tensiones cortantes nulas en paredes y fondo del canal, la ecuación de Bernoulli expresa lo siguiente (Marbello, 2005):

$$y_1 + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \quad (5)$$

$$y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \quad (6)$$

Por conservación de la masa,

$$\begin{aligned} Q &= A_1 V_1 = A_2 V_2 \\ Q &= B y_1 V_1 = B y_2 V_2 \end{aligned} \quad (7)$$

De donde:

$$V_1 = \frac{y_2}{y_1} V_2 \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 6, y haciendo $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 1$, se tiene:

$$y_1 + \frac{\left[\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 V_2^2\right]}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

$$y_1 - y_2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 \right] \quad (10)$$

$$y_1 - y_2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[\frac{(y_1^2 - y_2^2)}{y_1^2} \right] \quad (11)$$

$$(y_1 - y_2)y_1^2 = \left(\frac{V_2^2}{2g}\right)(y_1 + y_2)(y_1 - y_2) \quad (12)$$

$$V_2^2 = \frac{2gy_1^2}{(y_1 + y_2)} = \frac{y_1}{(y_1 + y_2)} 2gy_1 \quad (13)$$

Sacando raíz cuadrada,

$$V_2 = \sqrt{\frac{1}{\frac{(y_1 + y_2)}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)}} \sqrt{2gy_1} \quad (15)$$

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 15, se tiene:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{aC_c}{y_1}\right)}} \sqrt{2gy_1} \quad (16)$$

Introduciendo el coeficiente de velocidad, C_v , resulta:

$$V_{2real} = C_v V_2 \quad (17)$$

$$V_{2real} = C_v \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad (18)$$

Reemplazando las ecuaciones 18 y 2, en la ecuación 7, se tiene que:

$$Q = V_{2real} A_2 = V_{2real} B y_2 \quad (19)$$

$$Q = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} B y_2 \quad (20)$$

$$Q = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} B a C_c \quad (21)$$

$$Q = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} B a \sqrt{2gy_1} \quad (22)$$

Introduciendo el coeficiente de descarga C_d como:

$$C_d = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}}} \quad (23)$$

Resulta en:

$$Q = C_d a B \sqrt{2gy_1} \quad (24)$$

A partir de la ecuación 23, para C_v se tiene:

$$C_v = \frac{C_d}{C_c} \sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}} \quad (25)$$

$$C_v C_c = C_d \sqrt{1 + \frac{aC_c}{y_1}} \quad (26)$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación 26, se encuentra:

$$C_v^2 C_c^2 = C_d^2 \left(1 + \frac{aC_c}{y_1} \right) \quad (27)$$

$$C_c^2 = \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \left(1 + \frac{aC_c}{y_1}\right) \quad (28)$$

$$C_c^2 = \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 + C_c \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \quad (29)$$

$$C_c^2 - \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 C_c - \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 = 0 \quad (30)$$

$$C_c = \frac{\frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \pm \sqrt{\left(\frac{a}{y_1}\right)^2 \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^4 - 4(1) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2}}{2} \quad (31)$$

$$C_c = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{y_1}\right) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a}{y_1}\right)^2 \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^4 - \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2} \quad (32)$$

Introduciendo el término k haciendo:

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{y_1}\right) \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2 \quad (33)$$

Resultando en:

$$C_c = k \pm \sqrt{k^2 + \left(\frac{C_d}{C_v}\right)^2} \quad (34)$$

Encontrando así una relación entre los coeficientes de contracción C_c , descarga C_d , velocidad C_v , altura desde el fondo hasta la parte inferior de la compuerta a y la altura del flujo antes de la compuerta y_1 (Marbello, 2005).

Gentilini desarrolló una gráfica para encontrar el valor del coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas con descarga libre, siendo esta gráfica la presentada en la *Figura 4* y H. Rouse propuso que para compuertas planas verticales ($\theta = 90^\circ$), el coeficiente de descarga es esencialmente constante con ligeras variaciones lo cual se confirma con la gráfica de la *Figura 4* (Marbello, 2005).

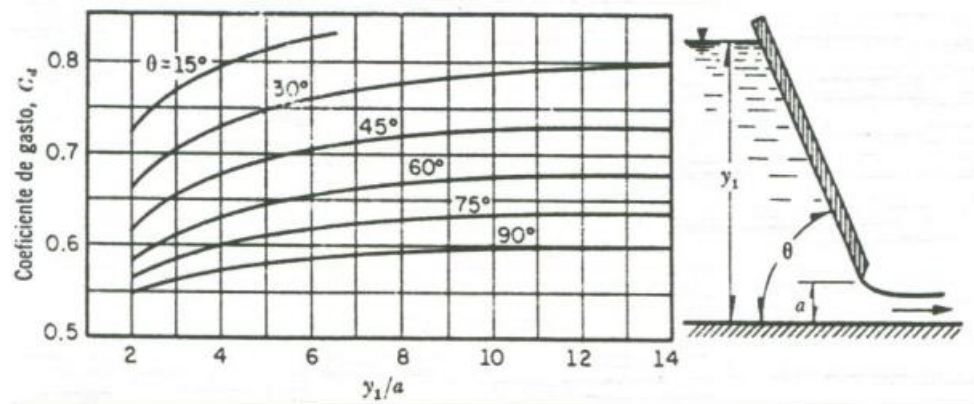


Figura 4 Coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas, con descarga libre (Marbello, 2005)

Partiendo de las expresiones de Gentilini, F. H. Knapp propuso una ecuación para calcular el coeficiente de velocidad, la cual es (Marbello, 2005):

$$C_v = 0.96 + 0.0979 \frac{a}{y_1} \quad (35)$$

Con límite superior $C_v = 1$, correspondiente a la relación $a/y_1 = 0.408$

Hay que tener en cuenta que estas suposiciones son para compuertas en las cuales el labio inferior de la compuerta termine en punta, para labios redondeados como se muestra en la *Figura 5*, los coeficientes de velocidad, descarga y contracción se hallan de la misma manera, pero multiplicados con un valor de épsilon que depende del radio de curvatura del labio y el valor de a .

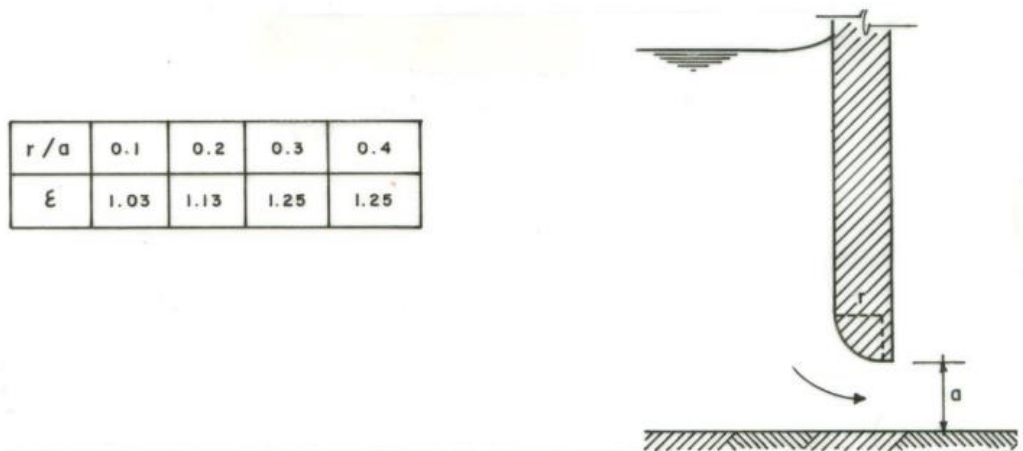


Figura 5 Factor de corrección épsilon para los coeficientes de descarga, velocidad y corrección con labio redondeado (Marbello, 2005)

H. R. Henry (1950) estudió ampliamente el coeficiente de descarga en compuertas planas verticales con descargas libres y sumergidas, cuyos resultados fueron corroborados por A. Confré y Buchheister, y mostrados en las curvas C_d vs. y_1/a en función de y_3/a , de la *Figura 6*. y_3 es la

profundidad de aguas debajo de la compuerta como se muestra en la *Figura 2*, operando con descarga sumergida (Marbello, 2005).

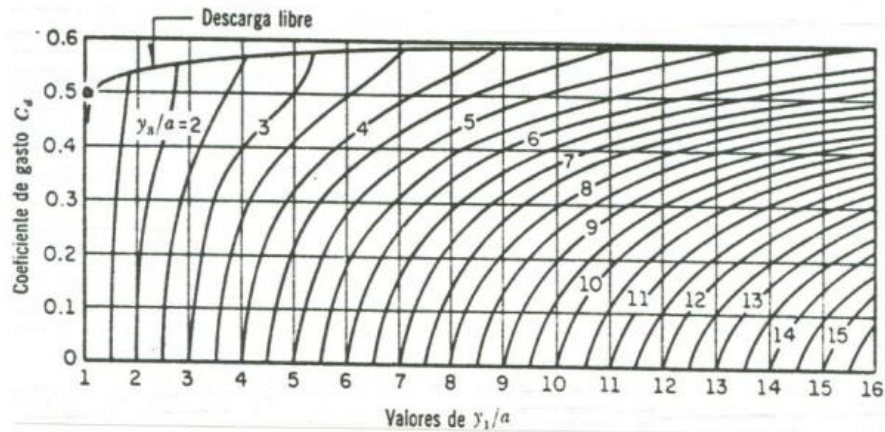


Figura 6 Coeficientes de descarga en compuertas planas verticales con descarga libre o sumergida (Marbello, 2005)

4.4 Fuente de información adicional

Para una mayor información adicional, puede consultar los siguientes enlaces:

- ✓ [5.Flujo a través de compuertas \(unal.edu.co\)](http://5.Flujo a través de compuertas (unal.edu.co))
- ✓ [\(99+\) Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS | David Abarca Gutiérrez - Academia.edu](http://(99+) Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS | David Abarca Gutiérrez - Academia.edu) (Chow, 1994)
- ✓ Al final del video de la práctica número 2 ((6) P2 Energía Específica y Régimen Crítico - YouTube), puede encontrar un paso a paso para encontrar el libro Hidráulica de Canales del profesor Máximo Villón Béjar (Villón, 1995).

5. Implementación de la simulación

5.1 Descripción del problema

Se tiene una compuerta de descarga libre en un canal rectangular con las siguientes condiciones:

$b = 2 \text{ [m]}$; ancho del canal

$Q = 2.5 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$; caudal

$C_c = 0.61$; coeficiente de contracción

$a = 0.35 \text{ [m]}$; apertura de la compuerta

Teniendo en cuenta las condiciones anteriormente mencionadas, encuentre el valor del tirante hidráulico aguas arriba de la compuerta, constate que el valor del caudal calculado mediante el programa computacional H-Canales sea igual al presentado en los datos y halle los valores del coeficiente de velocidad y el coeficiente de descarga.

5.2 Procedimiento de implementación

Para realizar la implementación en el programa, se desarrollará el siguiente procedimiento:

5.2.1 Ubicación del programa H-Canales

- ✓ Busque el acceso directo que se creó al instalar H-Canales, y ejecute el programa
- ✓ Al abrir el programa encontrará una ventana como se muestra en la *Figura 7*



Figura 7 Ventana del programa H-Canales

5.2.2 Ingreso de datos para la simulación

- ✓ Estando en la ventana de la *Figura 7*, dé clic en *Medición* y posteriormente en *Compuertas y Orificios* como se muestra en la *Figura 8*



Figura 8 Icono para realizar una medición de caudal

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana en la cual se pueden realizar cálculos en compuertas de admisión inferior, mostrado en la *Figura 9*

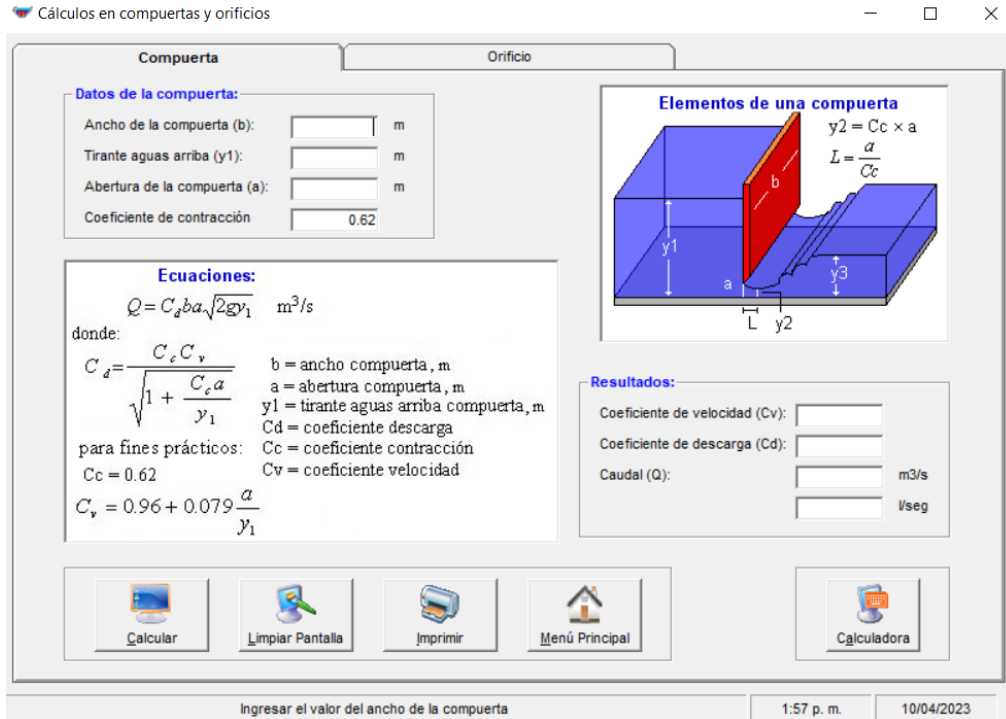


Figura 9 Ventana para el cálculo en compuertas y orificios

- ✓ Como es evidente en la *Figura 9*, en la sección de *Datos de la compuerta*, es necesario ingresar en el programa el valor del tirante aguas arriba de la compuerta, por lo que se realizará el siguiente procedimiento

5.2.3 Cálculo del tirante aguas arriba de la compuerta

Para el cálculo del tirante aguas arriba de la compuerta, puede utilizar la ecuación 22 de la siguiente forma:

$$Q = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 + \frac{a C_c}{y_1}}} B a \sqrt{2 g y_1} \quad (36)$$

Si reemplaza por lo valores presentados en la sección de descripción del problema y tiene en cuenta la ecuación 35 para el valor del coeficiente de velocidad, obtiene:

$$2.5 = \frac{\left(0.5856 + \frac{0.0209}{y_1}\right) (0.7) \sqrt{2 * 9.81 * y_1}}{\sqrt{1 + \frac{0.35 * 0.61}{y_1}}} \quad (37)$$

Al encontrar el valor de y_1 por el método de tanteo se tiene que $y_1 = 2.0238$

5.2.4 Continuación del ingreso de los datos a la simulación

Continuando con la simulación, continúe con los pasos a seguir:

- ✓ Teniendo el valor de la altura del tirante hidráulico antes de la compuerta, proceda a ingresar los valores de 2 metros, 2.0238, 0.35 y 0.61, que hacen referencia al ancho de la compuerta (b), tirante aguas arriba (y_1), abertura de la compuerta (a) y coeficiente de contracción (C_c) respectivamente; como se muestra en la *Figura 10*

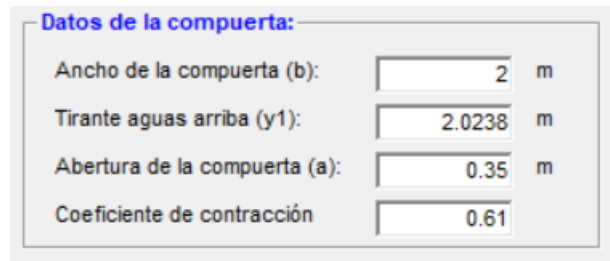


Figura 10 Datos de ingreso al programa

- ✓ Luego de clic en el icono de *Calcular* (*Figura 11*) que se encuentra en la parte inferior izquierda de la ventana presentada en la *Figura 9*

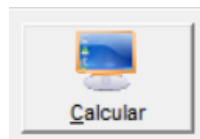


Figura 11 Icono de Calcular

- ✓ Y se ejecutará la simulación de tal manera que el programa presentará los resultados en la parte inferior derecha como se muestra en la *Figura 12*

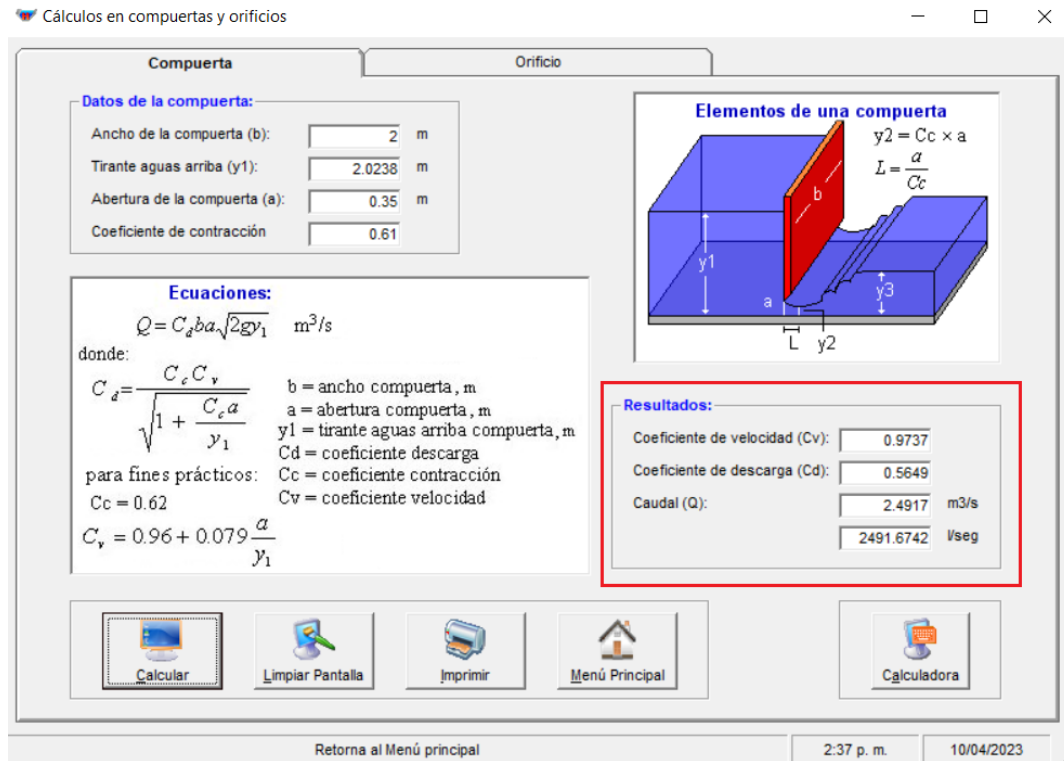


Figura 12 Ventana de resultados obtenidos

Nota: El programa presenta un error en la ecuación para cálculo para el coeficiente de velocidad, ya que calcula con el término de 0.079 en vez del término real (0.0979) que se muestra en la ecuación 35.

- ✓ De esta forma obtiene los resultados para el coeficiente de velocidad C_v , el coeficiente de descarga C_d y el caudal Q
- ✓ Y si se inspecciona el valor de caudal presentado por el programa y el caudal presentado en los datos iniciales del programa, encontrará que son aproximadamente el mismo

5.3 Video de la simulación

A continuación, se presentará el enlace del video que hace referencia a la simulación número dos presentada en este documento. Este video hace parte de una serie de tutoriales que ayudan al usuario en el manejo del programa computacional abordado en cada una de las simulaciones.

- ✓ Enlace del video: <https://www.youtube.com/watch?v=6aEKSCYgIIM>

6. Descripción del entregable

6.1 Entregables de la simulación inicial

Debe entregar en archivo PDF un documento donde se realice una captura de toda la pantalla (no solo una sección del programa computacional sino **TODA LA PANTALLA DEL ESCRITORIO**) de los siguientes pasos durante el proceso.

- ✓ La ventana inicial del programa H-Canales
- ✓ La ventana para el cálculo en compuertas y orificios mostrada en la *Figura 9*
- ✓ Los datos ingresados al programa mostrados en la *Figura 10*
- ✓ Los resultados de la simulación mostrados en la *Figura 12*

6.2 Preguntas de análisis

1. En sus palabras, ¿qué entiende por compuerta y cuál cree que es la diferencia fundamental entre las compuertas de descarga libre y las compuertas de descarga sumergida? (Utilice el marco teórico presentado en este documento y otras fuentes de información).
2. Desarrolle un paso a paso en el cual, encuentre el valor del caudal mediante la ecuación 22, teniendo en cuenta utilizar el valor del coeficiente de velocidad mediante la ecuación 35. Luego de ello realice un análisis de las variables que componen la ecuación 22, describiendo lo que representan físicamente dentro de la ecuación.
3. Realice la simulación para un canal con ancho de compuerta de 1,5 metros, caudal de 1.5 [m³/s], abertura de la compuerta de 0.2 [m] y coeficiente de contracción de 0.7, teniendo en cuenta que la compuerta es de descarga libre (utilice la ecuación 35 de ser necesaria en algún punto); halle el valor de la velocidad real en la sección 2 de la compuerta, utilizando el coeficiente de velocidad presentado en la ecuación 35 de este documento. Presente un paso a paso del procedimiento realizado y finalice con conclusiones de lo observado.

7. Referencias Bibliográficas

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTO
S

Marbello, R. (2005). 5. *Flujo a través de compuertas*. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%209.pdf?sequence=18&isAllowed=y>

Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales*. <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>.
<https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>