

Universidad
Industrial de
Santander



MANUAL DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

PRÁCTICA 8

VERTEDEROS

ESCUELA DE
INGENIERIA
Civil

Contenido

Laboratorio 8. Calibración de Vertederos	2
1. Marco Teórico.....	4
1.2. Vertederos de pared delgada	4
1.1. Vertederos de pared gruesa	7
1.2. Vertederos tipo Spillway	8
2. Objetivos.....	9
3. Procedimiento	9
4. Equipo utilizado.....	9
5. Datos	10
6. Resultados	10
7. Cálculo tipo	11
8. Resultados y preguntas:	14
9. Observaciones y conclusiones	14
10. Referencias Bibliográficas	15

Listado de Ecuaciones

Ecuación 1	5
Ecuación 2	5
Ecuación 3	6
Ecuación 4	6
Ecuación 5	6
Ecuación 6	6
Ecuación 7	6
Ecuación 8	6
Ecuación 9	6
Ecuación 10	8
Ecuación 11	8
Ecuación 12	8
Ecuación 13	8
Ecuación 14	8

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1: Vertedero de pared delgada [1]	5
Ilustración 2: Vertedero rectangular sin contracción [2]	7
Ilustración 3: Vertedero rectangular con contracción [3]	7
Ilustración 4: Vertedero triangular [4]	7
Ilustración 5: Vertedero de pared gruesa[5]	8
Ilustración 6. Gráfica de resultados [6]	10

Listado de Tablas

Tabla 1 Datos generados.....	9
Tabla 2 Datos.....	10
Tabla 3 Resultados primera parte	11
Tabla 4 Resultados aplicando logaritmo	12
Tabla 5. Cd teórico	13

El diseño de las guías de las prácticas presenciales toma como referencia el trabajo de grado desarrollado por Laiton Suárez (2022), del cual se adaptaron algunos lineamientos metodológicos.

Laboratorio 8. Calibración de Vertederos

1. Marco Teórico

Las estructuras hidráulicas son dispositivos utilizados para regular o medir el caudal. Algunos son de geometría fija, mientras que otros pueden ser mecánicamente ajustados. Las estructuras hidráulicas forman parte de la mayoría de los proyectos de ingeniería hidráulica, como sistemas de riego, suministro de agua, tratamiento de aguas residuales, centrales hidroeléctricas. Por conveniencia estas estructuras se agrupan en tres grupos

- Estructuras de medición: vertederos y canaletas
- Estructuras de regulación: compuertas y válvulas
- Estructuras de descarga: aliviaderos (spillways)

Las estructuras de medición se basan en una relación profundidad-caudal obtenida de la aplicación de la ecuación de Bernoulli. Sin embargo, algunas modificaciones se deben incluir en las ecuaciones para considerar efectos como las pérdidas que inevitablemente ocurren en los fluidos.

Algunas estructuras de medición son diseñadas para incluir la formación de la profundidad crítica en algún punto dentro de la estructura y mediante la utilización de condiciones críticas determinar el caudal. Las estructuras de medición que utilizan este concepto son el vertedero de pared gruesa y la canaleta Parshall. Entre las estructuras que no inducen la profundidad crítica para la medición del caudal está el vertedero de pared delgada. Los vertederos son estructuras de medición que pueden definirse como simples aberturas (orificios en el borde superior) por las que fluye un líquido.

Con el fin de apurar el caudal en un canal y en algunos casos también de mantener una profundidad de agua relativamente estable, independientemente del caudal transportado y de esa forma permitir la derivación de agua a canales secundarios a través de bocatomas laterales, se construyen los vertederos de cresta aguda, que en esencia consisten en una placa montada en ángulo recto a la dirección del flujo y que termina en una cresta de borde agudo. El verdadero puede tener una cresta del mismo ancho del canal, en cuyo caso se conoce como vertedero no contraído o tener una abertura de forma rectangular, triangular o trapezoidal, conociéndose en estos casos como vertedero contraído.

1.2. Vertederos de pared delgada

Muchas fórmulas experimentales para la descarga sobre el vertedero de cresta delgada se han desarrollado. La mayoría de tales fórmulas se pueden expresar de modo general $Q = CLH^{2/3}$. En donde C es el coeficiente de descarga, L es la longitud efectiva de la cresta

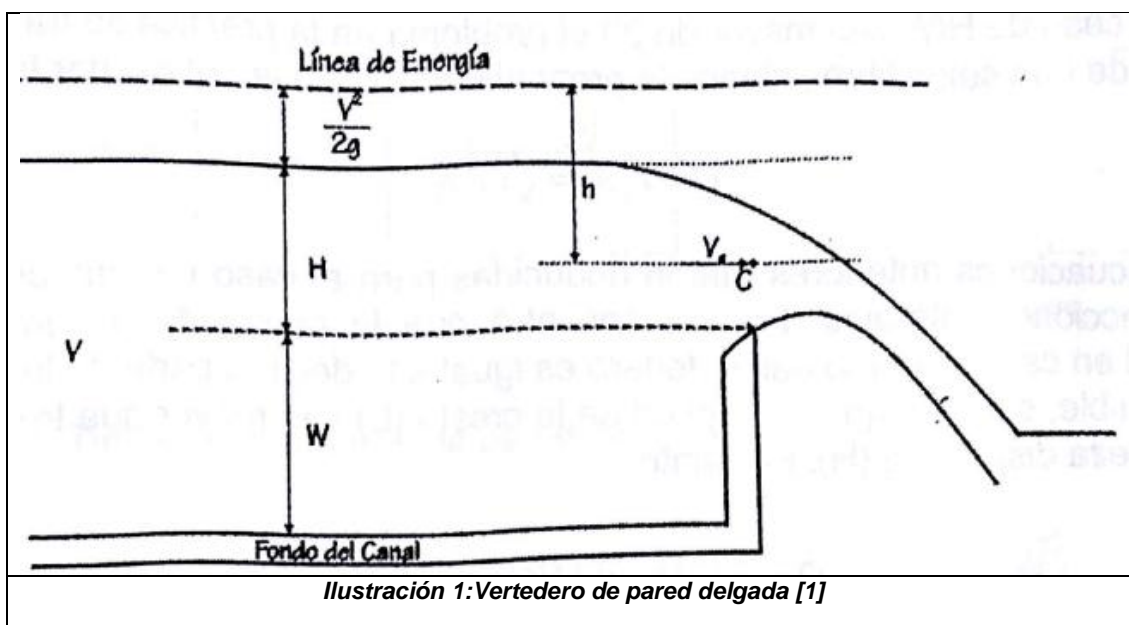
del vertedero y H es la altura media sobre la cresta del vertedero hasta el nivel del agua en una distancia para el cual el efecto del vertedero no es significativo.

Para la deducción de las ecuaciones de parte del análisis de la figura 1 en donde se considera que los límites superiores e inferiores de manto del agua se encuentran a la presión atmosférica, pero que debido a la curvatura de la salida del vertedero no se logra la presión atmosférica en una sección recta, sino un poco más adelante en donde se presenta una sección de espesor menor como lo cual incluye el concepto de coeficiente de contracción en el desarrollo de la fórmula.

aplicando la ecuación de Bernoulli a lo largo de la línea de corriente entre un punto ubicado aguas arriba del vertedero, donde el efecto de la curva del agua producido por el vertedero haya desaparecido, y el punto C se obtiene de la siguiente ecuación.

$$Q_{ideal} = \frac{2}{3} (2g)^{1/2} H^{3/2}$$

Ecuación 1



Para obtener el caudal real hay necesidad de incluir, aunque eficiente que tenga en cuenta los efectos de viscosidad, pérdidas como distribución aerostática de presiones sobre el vertedero. De esta forma el caudal real está dado por la fórmula

$$Q = \frac{2}{3} C_d (2 g)^{1/2} b H^{3/2}$$

Ecuación 2

Donde:

b: longitud de la cresta del vertedero

H: Altura del agua por encima de la cresta del vertedero

C_d : coeficiente de descarga, la determinación exacta de este coeficiente ha requerido estudios experimentales y existen diferentes fórmulas para calcular. Una forma que ha proporcionado buenos resultados es la conocida fórmula de Rehbock:

$C_d = 0.602 + 0.083 \frac{H}{W}, \text{ en unidades metricas}$	Ecuación 3
---	-------------------

Válida para

$$30 \text{ mm} < H < 750 \text{ mm} \quad b > 300 \text{ mm} \quad W > 100 \text{ mm} \quad H < W$$

Cuando le ve muy grande el segundo término en la ecuación de C_d tiende a cero y el coeficiente C_d a 0.602 escribiéndose la ecuación 2 como:

$Q = 1.778 b H^{3/2}$	Ecuación 4
-----------------------	-------------------

En el caso de H/W sea mayor de 20 el problema en la práctica se transforma en el de una caída libre, siendo la profundidad igual a la crítica, Por tanto:

$Q = V_c A_c = \sqrt{g y_c b}$	Ecuación 5
--------------------------------	-------------------

Las ecuaciones anteriores se dedujeron para el caso de vertederos incontrolados en los laterales. Francis encontró que la cantidad de contracción lateral en cada extremo del vertedero es igual a la décima parte de la cabeza disponible, siempre que la longitud de la cresta (L) sea mayor que tres veces la cabeza disponible (H). por tanto:

$Q = \frac{2}{3} C_c (b - 0.1 N H) (2g)^{1/2} H^{3/2}$	Ecuación 6
--	-------------------

Siendo N el número de contracciones igual a dos para un vertedero de pared delgada contraído

La descarga de los vertederos de abertura triangular o en V; Se determina de forma similar al desarrollo analítico realizado con los vertederos rectangulares, obteniéndose:

$Q = \frac{8}{15} C_d \tan(\alpha/2) (2g)^{1/2} H^{5/2}$	Ecuación 7
--	-------------------

Siendo un ángulo de 90° el más empleado para la abertura, encontrándose que para este tipo de vertederos el coeficiente de descarga se aproxima a 0.585, la ecuación anterior da:

$Q = 1.38 H^{5/2}$	Ecuación 8
--------------------	-------------------

Aunque con mediciones experimentales se ha logrado resultados más exactos mediante la fórmula corregida:

$Q = 1.3372 H^{2.48}$	Ecuación 9
-----------------------	-------------------

Los vertederos triangulares están limitados a flujos menores de 300 L por segundo

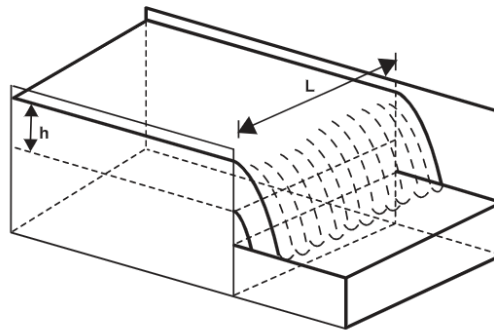


Ilustración 2: Vertedero rectangular sin contracción [2]

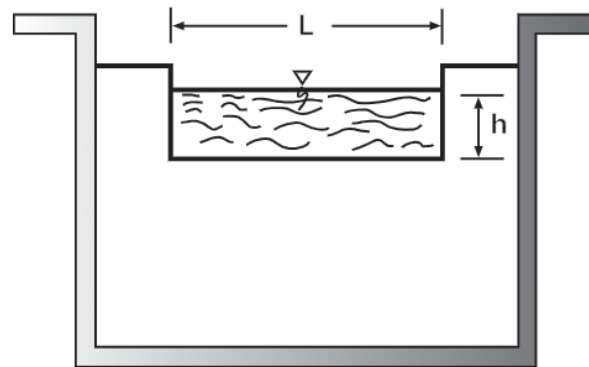


Ilustración 3: Vertedero rectangular con contracción [3]

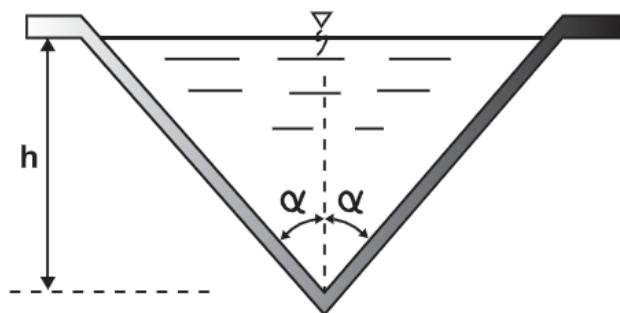
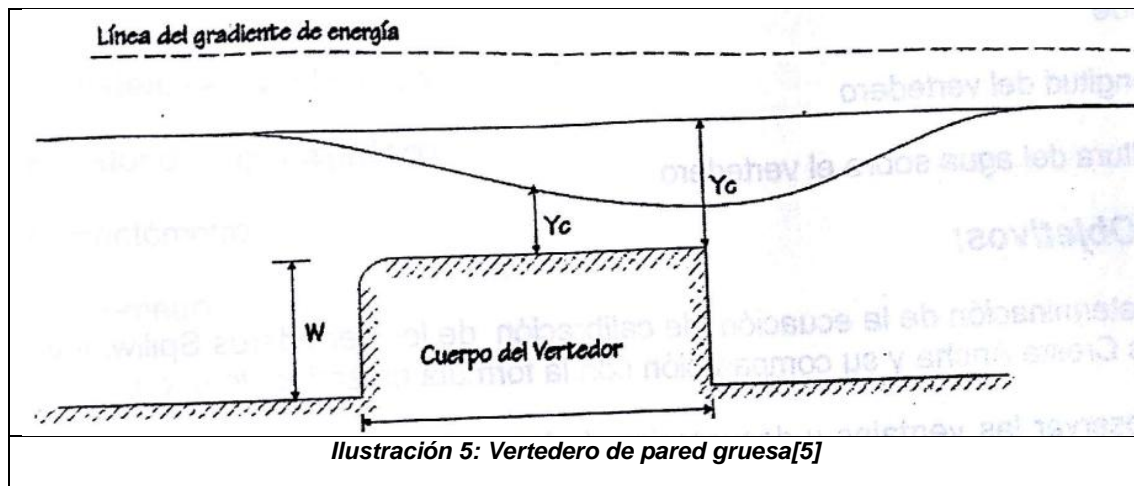


Ilustración 4: Vertedero triangular [4]

1.1. Vertederos de pared gruesa

Aplicando el principio de conservación del momento al flujo sobre un vertedero de cresta ancha



La fórmula para obtener el caudal de un vertedero de pared provincial se puede obtener a partir del análisis de condiciones críticas sobre el vertedero

$Q_{ideal} = V_c A_c = \sqrt{g y_c} b$	Ecuación 10
--	--------------------

La profundidad crítica en el canal rectangular con una energía específica disponible H está dada por:

$y_c = \frac{2}{3} H$	Ecuación 11
-----------------------	--------------------

Reemplazando el valor de y_c e incluyendo el coeficiente C_d se tiene:

$Q_{ideal} = b C_d \sqrt{g \frac{2}{3}} H^{3/2}$	Ecuación 12
--	--------------------

simplificando valores se tiene:

$Q_{ideal} = 1.705 C_d b H^{3/2} = C b H^{3/2}$	Ecuación 13
---	--------------------

1.2. Vertederos tipo Spillway

La ecuación de descarga de los vertederos tipo Spillway es similar a la de los vertederos de pared gruesa, con la diferencia de que el exponente de H es desconocido.

$Q = C_d b H^n = C H^n$	Ecuación 14
-------------------------	--------------------

Dónde:

B: longitud del vertedero

H: altura del agua sobre el vertedero

2. Objetivos

- 1) Calibrar y analizar el comportamiento hidráulico de los vertederos de cresta delgada, tanto rectangular como triangular, para determinar su eficiencia como dispositivos de medición de caudal en canales abiertos.
- 2) Determinar el caudal real que circula por el canal mediante el método volumétrico, para utilizarlo como referencia en la calibración de ambos vertederos.
- 3) Calcular el caudal teórico para los vertederos rectangular y triangular aplicando las ecuaciones hidrométricas correspondientes y compararlo con los datos experimentales.
- 4) Evaluar el coeficiente de descarga (C_d) de cada vertedero y analizar la relación entre la carga hidráulica y el caudal descargado, determinando la precisión y el desempeño de ambos dispositivos.

3. Procedimiento

- Medir el caudal mediante el método volumétrico:
Encender la bomba, abrir las válvulas y recolectar un volumen conocido de agua en el tanque volumétrico. Medir el tiempo de llenado y calcular el caudal.
- Medir las variables hidráulicas en los vertederos rectangular y triangular:
Registrar la carga h sobre el vertedero rectangular y, en el caso del vertedero triangular, medir también el ángulo θ de la placa acrílica en V.
- Instalar el vertedero rectangular y medir la altura aguas arriba:
Colocar la placa rectangular en el canal, estabilizar el flujo y medir la altura de referencia y las cargas h correspondientes.
- Repetir el procedimiento para el vertedero triangular:
Retirar el vertedero rectangular, instalar la placa acrílica triangular (muesca en V), estabilizar el flujo y repetir todas las mediciones.

Caudal [m^3/s]	H [cm]
21.17	5.5
21.19	5.4
21.18	5.3

Tabla 1 Datos generados

4. Equipo utilizado

- Canal rectangular de vidrio.
- Regla, flexómetro o metro.
- Sistema de bombeo.
- Vertedero rectangular y triangular.

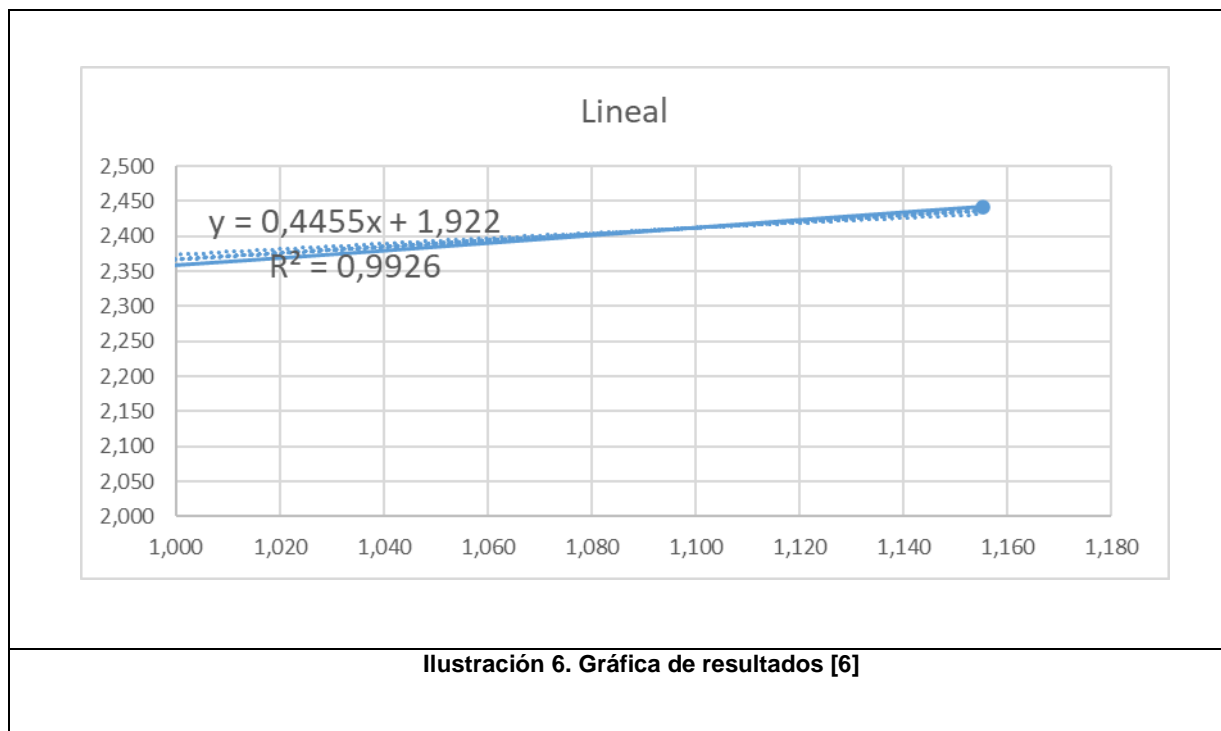
5. Datos

Q prom	H prom
2,03	9,4
2,61	10,4
3,18	11,5

B	0.08	m
----------	------	---

Tabla 2 Datos

6. Resultados



7. Cálculo tipo

A partir de los registros obtenidos, se procedió al cálculo del caudal observado por el método volumetrico.

$$Q = \frac{\text{Volumen (l)}}{\text{Tiempo (s)}}$$

La ecuación modelo utilizada para este tipo de medidores de caudal experimentalmente es del tipo exponencial, para calibrar la ecuación de vertedero:

$$Q = C H^n$$

Para poder utilizar la regresión lineal para el ajuste de la ecuación de descarga del vertedero se requiere linealizar una función, para ello se toman logaritmos en ambos lados de la ecuación obteniéndose:

$$\ln Q = \ln C + n \ln H$$

Haciendo:

$$Y = \ln Q \quad a = \ln C \quad b = n \quad X = \ln H$$

A partir del análisis realizado, se observa que la ecuación resultante presenta la forma general de una recta:

$$Y = a + bx$$

Que la forma de linealidad de la ecuación de descarga con parámetros a y b son desconocidos y se van empleando los datos Q y H encontrados experimentalmente.

los valores de a y b se determinan por medio de la gráfica

El procedimiento para la obtención de los resultados consiste en aplicar logaritmos tanto a los caudales reales como a las alturas HHH. En este proceso, el logaritmo se calcula a partir de los valores promedio del caudal y de la altura del agua.

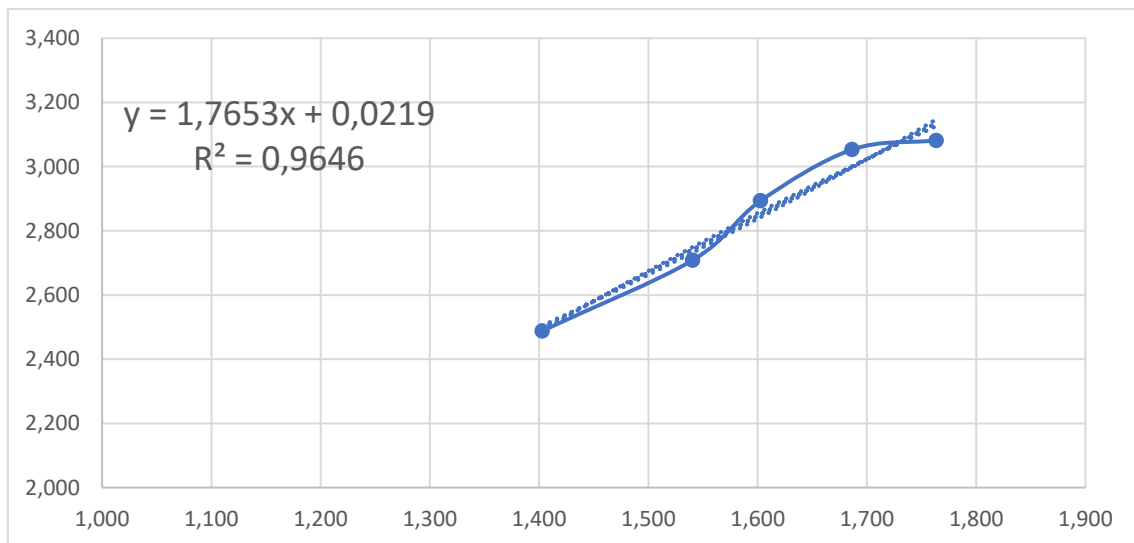
	Q prom	H prom
	2,03	9,4
	2,61	10,4
	3,18	11,5
Tabla 3 Resultados primera parte		

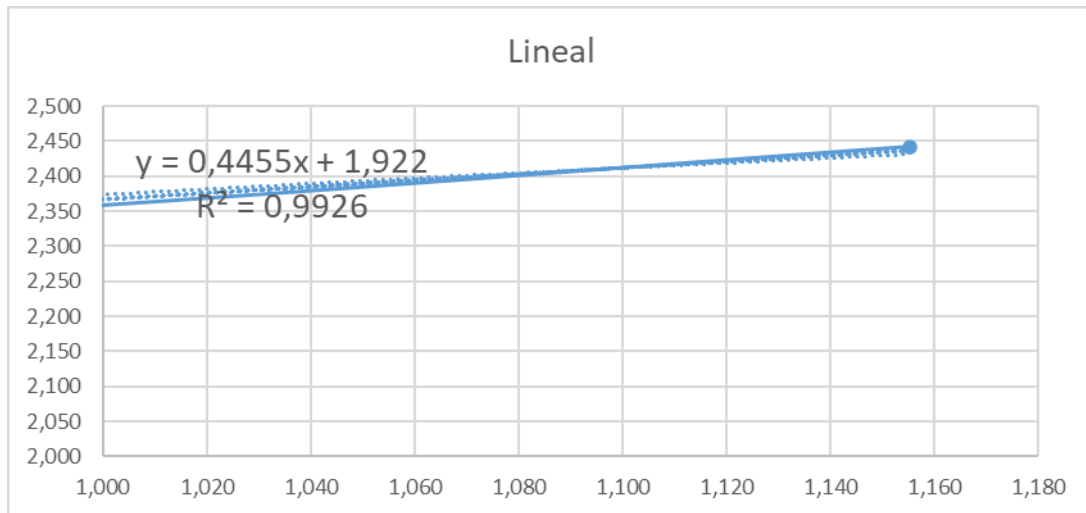
Ln(Q)	Ln(H)
0,706	2,241
0,959	2,339
1,155	2,442

Tabla 4 Resultados aplicando logaritmo

Graficar los valores de LogH en función de LogQ.

Ajustar una línea de tendencia a la nube de puntos obtenida y determinar la ecuación que mejor representa dicha relación.





$$a = 1,922 \quad b = 0,4455 \quad c = 6,8$$

Y tenemos

$$Q_{\text{calibrado}} = 6,8 * 9,4^{0,4455} = 18,51 \frac{L}{s}$$

Una vez definida la ecuación de calibración, se calculan los caudales generados y se comparan con los caudales observados; adicionalmente, se determina el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración correspondiente al vertedero.

También se realizará una estimación del coeficiente de descarga para el vertedero triangular y el vertedero rectangular.

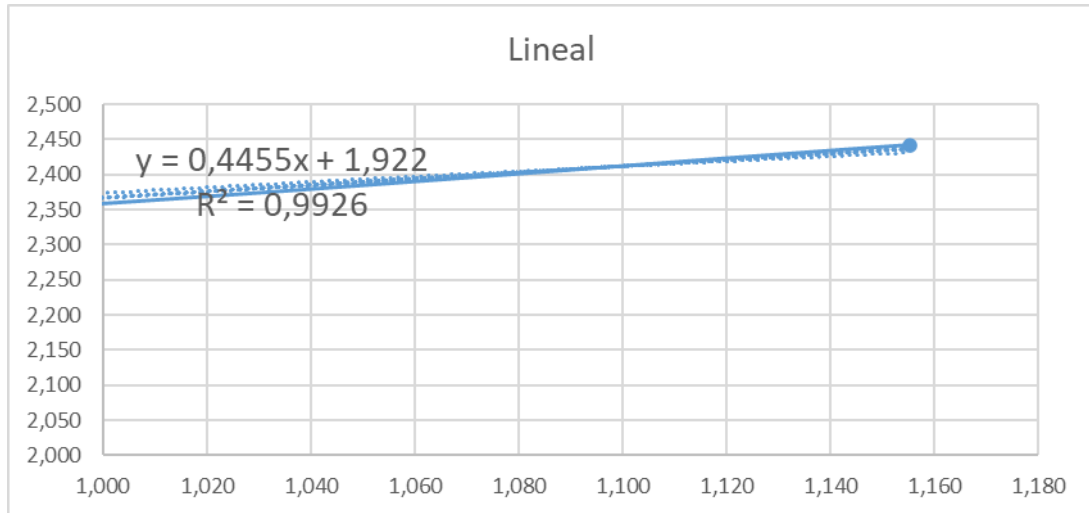
<u>Calculo cd método teórico.</u>	
Rectangular	$Q_{\text{teorico}} = \frac{2}{3} C_d (2g)^{1/2} b H^{3/2}$
Triangular	$Q_{\text{teorico}} = \frac{8}{15} C_d \tan(\alpha/2) (2g)^{1/2} H^{5/2}$
Tabla 5. Cd teórico	

Porcentaje de error de Q:

$$\% EQ = \frac{(Q_t - Q_{calib})}{Q_t} * 100$$

Repetimos lo mismo con el vertedero triangular.

8. Resultados y preguntas:



- 1) ¿Cómo influye la forma del vertedero (rectangular vs. triangular) en el valor del coeficiente de descarga C_d y por qué?
- 2) Si se repitiera el experimento con un caudal mayor, ¿cómo esperas que cambie el patrón del perfil de superficie y el régimen de flujo?

9. Observaciones y conclusiones

- 1) ¿Qué pasa si se aumenta la lámina de agua H sobre la cresta del vertedero?
¿Cómo cambia el caudal y qué ocurre con el valor del coeficiente de descarga C_d ?
- 2) ¿Qué pasa si se aumenta el ángulo del vertedero triangular (V)? ¿Qué efecto tendría en la sensibilidad del vertedero ante cambios pequeños en H ?

10. Referencias Bibliográficas

M. V. Béjar, *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.

V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota: McGraw-Hill, 2000.

G. E. GAVILAN LEON, *GUIA DE LABORATORIO DE HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bucaramanga: UISEscuela de Ingenieria Civil, 2001.

Portillo España, L. E. (2012). *Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales* (Trabajo de graduación, Ingeniería Civil).

Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3356_C.pdf