



Artículo

Calibración de vertedero triangular de pared delgada a la salida de un desarenador en el Centro Experimental Cota Cota

Calibration of thin-walled triangular weir at the exit of a sand trap at the Cota Cota Experimental Center

Genaro Serrano Coronel

RESUMEN:

La calibración del vertedero triangular de placa delgada, fue planteado en razón que el vertedero ubicado a la salida de un desarenador en el Centro Experimental de Cota Cota (CECC), fue recortado en sus lados con el fin ampliar la capacidad de descarga, generando un ángulo de escotadura de $72,4^\circ$. El trabajo fue realizado bajo el enfoque de investigación acción, considerando que se ha partido de referencias que definen y plantean relaciones matemáticas a partir de investigaciones en vertederos triangulares de pared delgada. El experimento fue desarrollado a partir de los valores obtenidos en campo, mediante el método volumétrico. El análisis de los resultados comprende la influencia del coeficiente de descarga C_d , cuando se establece un único valor determinado por el ajuste lineal entre los caudales observados y los caudales teóricos, advirtiéndose que los valores de caudal real ajustados por el C_d variable en función a la altura de carga y coeficientes de ajuste, se subestiman a la menor altura (9,20 cm) y sobreestiman a la mayor altura (14 cm) en relación a los caudales determinados mediante un único coeficiente de descarga, incluso a los valores de campo, pero nos permite reflejar con mejor precisión a los valores observados en campo.

PALABRAS CLAVE:

vertedero, calibración, vertedero triangular, ajuste, hidráulica.

ABSTRACT:

The calibration of the triangular thin plate spillway was proposed because the spillway located at the exit of a sand trap at the Cota Cota Experimental Center (CECC) was cut on its sides in order to expand the discharge capacity, generating a notch angle of 72.4° . The work was carried out under the action research approach, considering that it was based on references that define and propose mathematical relationships based on investigations in thin-walled triangular landfills. The experiment was developed from the values obtained in the field, using the volumetric method. The analysis of the results includes the influence of the discharge coefficient C_d , when a single value determined by the linear adjustment between the observed flow rates and the theoretical flow rates is established, noting that the real flow values adjusted by the variable C_d depending on the loading height and adjustment coefficients, are underestimated at the lowest height (9.20 cm) and overestimated at the highest height (14 cm) in relation to the flow rates determined by means of a single discharge coefficient, even to the field values, but it allows us to reflect with better precision the values observed in the field.

KEYWORDS:

weir, calibration, triangular weir, adjustment, hydraulics.

AUTORES:

Genaro Serrano Coronel: Docente investigador, Área de recursos hídricos, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. gserrano@umsa.bo

DOI: <https://doi.org/10.53287/xeoy9194kt95b>

Recibido: 06/03/2024. Aprobado: 23/04/2024.



INTRODUCCIÓN

Para el manejo del agua de riego, el Centro Experimental Cota Cota (CECC) cuenta con algunas estructuras hidráulicas que permiten efectuar la captación, conducción y distribución del agua, entre los cuales tenemos un desarenador que dispone de compuerta de ingreso y vertedero triangular de pared delgada, ubicado a la salida del desarenador, que nos permite captar el agua del río Jillusaya entre 1 a 10 L/s.

De acuerdo con Marbello (2005, p 24), para medir pequeños gastos el vertedero triangular es más preciso que el rectangular, puesto que, para un mismo caudal, los valores de altura (h) son mayores.

Para Sotelo (1994, p 241), cuando la descarga se efectúa por encima de una placa con perfil de cualquier forma, pero con arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada.

Según Gourley y Grimp (Marbello Peres 2005, p 27), citado por Salazar E. & Cedillo M. (2017), mediante ensayos en laboratorio, determinaron la siguiente ecuación de caudal en función del ángulo de abertura del vertedero:

$$Q = 1,32 \tan (\vartheta/2) H^{2,48} \quad [1,1]$$

Donde: Q = Caudal (m³/s); H = Carga sobre el vertedero (m); ϑ = Ángulo de abertura del vertedero (°)

De acuerdo con Salazar E. & Cedillo M. (2017, p 21), la ecuación 1,1 fue establecida para 45°, 60° y 90°, [...] son válidas para cargas dentro del rango de 0,05 a 0,60 m.

Debemos indicar que el vertedero triangular de placa delgada colocado a la salida del desarenador, fue recortado en sus laterales con el fin de ampliar la capacidad de descarga. Una alteración de la geometría de los vertederos de pared delgada de seguro que afectará en los valores de los coeficientes de la ecuación que se adecua para determinado ángulo y tipo de vertedero, principalmente en el coeficiente de descarga (Cd), que influye directamente en la precisión de la medición del caudal real estimado en función de la altura de carga o tirante hidráulico. Por lo anterior, el estudio comprende realizar la calibración del vertedero triangular de pared delgada a partir del método volumétrico, a la salida de un desarenador en el CECC., a fin de establecer una ecuación que nos

permita medir el caudal en condiciones de campo de manera indirecta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El vertedero es un componente de medición del desarenado, que está ubicado en la ribera derecha del río Jillusaya, entre las coordenadas de 68° 3' 50,45" longitud Oeste y 16° 32' 13,50" de latitud Sur, a una altitud de 3424 m.s.n.m. reflejados en la Figura 1.



Figura 1. Ubicación del desarenador en el CECC.

La mayoría de las ecuaciones o relaciones para determinar el caudal fueron desarrollados a nivel de laboratorio y para ángulos específicos, empleando coeficientes que a determinadas cargas (alturas) resultan constantes, como el descrito en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes experimentales en vertederos triangulares.

Angulo (2 θ)	15°	30°	45°	60°	90°	120°
H >	0,250	0,205	0,185	0,170	0,140	0,120
m	0,343	0,330	0,325	0,320	0,312	0,322
c	0,643	0,619	0,609	0,600	0,587	0,604
K	0,200	0,392	0,596	0,818	1,386	2,471

Fuente: Domínguez F. (1999, p 470)

Se acuerdo con Mattos (s/f cap.4) citado por Serrano (2022, p 61), los vertederos son estructuras que tienen aplicación muy extendida en todo tipo de sistemas hidráulicos y expresan una condición especial de movimiento no uniforme en un tramo con notoria diferencia de nivel. Normalmente desempeñan funciones de seguridad y control.

Considerando la función de control del flujo de agua que deben cumplir los vertederos, en este caso de un vertedero triangular de pared delgada alterada en su sección con un ángulo de 74,4°. Se ha

realizado el proceso de calibración, para expresar los caudales en condiciones de campo a partir del método volumétrico, donde el volumen fue medido mediante un recipiente cilíndrico de 28 cm de diámetro, tomando valores del tiempo mediante un cronómetro para las diferentes alturas registradas en el recipiente.

Como mínimo se ha establecido realizar los ensayos de aforo para tres alturas de tirante, cercanos al caudal que frecuentemente se utiliza (5 L/s). Para cada una de las alturas el caudal de ingreso al desarenador fue regulado y estabilizado en la boca toma mediante la compuesta de ingreso al desarenador. En cada altura se han tomado 4 lecturas, habiéndose desechado uno de los valores extremos, quedando 3 medidas para cada altura, con los cuales se determinó el caudal promedio, tal como se muestra en los datos de la Tabla 2.

Tabla 2. Datos obtenidos en la medida de caudales a 3 alturas.

H (cm)	t (s)	h (cm)	d (cm)	V (cm ³)	Q(L/s)
9,70	3,83	22,0	27	12596,2	3,289
9,70	3,17	22,2	27	12710,8	4,010
9,70	3,99	20,0	27	11451,1	
9,70	3,25	21,2	27	12138,2	3,735
Q prom =					3,678
12,30	2,52	25,5	27	14600,2	5,794
12,30	2,81	25,0	27	14313,9	5,094
12,30	3,1	25,5	27	14600,2	
12,30	2,51	24,3	27	13913,1	5,543
Q prom =					5,477
14,00	1,83	25,0	27	14313,9	7,822
14,00	1,93	28,0	27	16031,6	
14,00	2,29	28,5	27	16317,9	7,126
14,00	2,17	27,0	27	15459,0	7,124
Q prom =					7,357

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fórmulas experimentales y calibración

Generalmente la fórmula de vertederos triangulares (ecuación 3,1) se expresa para trabajar en el sistema internacional, es decir que la unidad de caudal nos da en m³/s introduciendo la altura en metros.

Considerando la utilidad práctica de estos vertederos para medir caudales reducidos entre 0,5 a 20 L/s, con alturas pequeñas (5 a 20 cm) que

dependerán del ángulo, es necesario introducir los factores de conversión a la siguiente fórmula general:

$$Qt = \frac{8}{15} \sqrt{2g} * \operatorname{tag} \left(\frac{\theta}{2} \right) H^{2,5} \quad [3,1]$$

Donde: Qt = Caudal teórico (m³/s); g = Aceleración de la gravedad (m/s²); H = Altura o tirante de agua sobre la cresta (m).

Para medir el caudal en litros/segundo en función de la altura en cm, a la ecuación 3,1 se incluyen los valores que se muestra en la ecuación 3,2.

$$Qt = \frac{8}{15} \sqrt{2g} * \operatorname{tag} \left(\frac{\theta}{2} \right) \left(\frac{H}{100} \right)^{2,5} 1000 \quad [3,2]$$

De manera que la fórmula de caudal teórico en función del ángulo y altura quedará:

$$Qt = \frac{8}{1500} \sqrt{2g} * \operatorname{tag} \left(\frac{\theta}{2} \right) H^{2,5} \quad [3,3]$$

Para determinar el caudal real es necesario emplear un coeficiente de descarga (Cd), es decir multiplicar este coeficiente al caudal teórico:

$$Qr = Cd * Qt \quad [3,4]$$

Despejando de la anterior relación el coeficiente de descarga en términos de las variables del caudal teórico (Qt), además de considerar la relación de caudal corregido o calibrado (Qc), obtenemos la siguiente relación:

$$Cd = \frac{Qr}{Qt} = H \frac{Qc}{\frac{8}{1500} \sqrt{2g} \operatorname{tag} \left(\frac{\theta}{2} \right) H^{2,5}} \quad [3,5]$$

Donde: Qt = Caudal teórico (L/s); Qc = Caudal corregido (L/s), a obtener; g = Aceleración de la gravedad (m/s²); H = Altura de agua sobre la cresta (cm).

En todo caso, para obtener el valor del coeficiente de descarga para un ángulo de 72,4°, la ecuación 3,5 se reduce en la ecuación 3,6, donde K y n son coeficientes de la fórmula corregida.

$$Cd = \frac{Qr}{Qt} = H \frac{Qc}{\frac{8}{1500} \sqrt{2g} \operatorname{tag} \left(\frac{\theta}{2} \right) H^{2,5}} \quad [3,6]$$

Los caudales determinados (Qo1, Qo2 y Qo3) a diferentes alturas (Tabla 3) a través del método volumétrico en unidades de L/s, son datos observados considerados valores reales de campo,

con los cuales se obtiene los caudales observados promedios (Qop) para realizar el ajuste por los diferentes métodos:

Tabla 3. Caudales promedio (L/s) para diferentes alturas

H (cm)	Qo1	Qo2	Qo3	Qop
9,70	3,289	4,010	3,735	3,678
12,30	5,794	5,094	5,543	5,477
14,00	7,822	7,126	7,124	7,357

Calibrar un vertedero consiste en determinar experimentalmente los valores de las constantes α y β de la ecuación general (Marbello, 2005, p 37). En apego a esta definición procederemos a realizar la calibración del vertedero triangular para un ángulo de 72,4°.

En principio realizaremos el ajuste de los valores obtenidos en campo por el método de mínimos cuadrados, a través de ecuación 3,7 de tipo potencial que nos permite obtener el caudal corregido En este caso los valores de H representan a la variable independiente y se necesitan encontrar los valores de K y n.

$$Q = K * H^n \quad [3,7]$$

Donde: Q = Caudal descargado por el vertedero; H = Tirante hidráulico por encima de la cresta; K = Coeficiente que depende del tipo de vertedero; n = Exponente de altura de carga, que depende de la forma de escotadura del vertedero.

Aplicando logaritmos en ecuación general [3,7], resulta la ecuación de una recta (Y = A + B X):

$$\log Q = \log K + n \log H \quad [3,8]$$

Donde: Y = Log Q; A = Intercepto con el eje Y (A = log K); B = Es la pendiente (B = n); X = Log H

La ecuación general ajustada resulta:

$$Qc = 0,0527 H^{1,8634} \quad [3,9]$$

Mediante el método de regresión, considerando como mínimo tres pares de datos, a través de graficar en una hoja de cálculo Excel, se verifica la línea de tendencia de tipo potencial mostrado en la Figura 2.

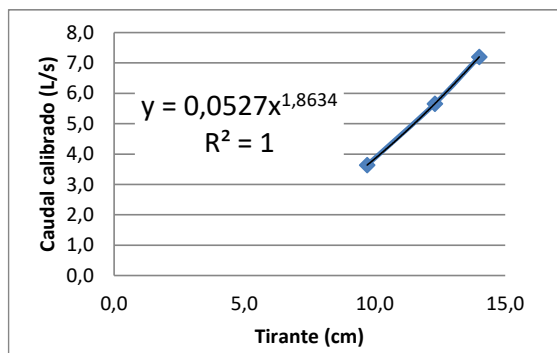


Figura 2. Ajuste de curva por el método de regresión

En ambos casos la relación será la misma, sin embargo, cuando el caudal real ajustado se obtiene involucrando el coeficiente de descarga Cd (Ecu 3,6) mediante los coeficientes K y n ajustados, el Cd en función de la altura o tirante de agua sobre la cresta, tendrá diferentes valores, por lo que tendremos para cada altura un caudal real ajustado óptimo (Qra°).

Tabla 4. Resultado de valores de caudal obtenido por diferentes métodos

H	Qo	Qc	Qt	Cd	Qra°
9,70	3,678	3,636	5,067	0,718	3,635
12,30	5,477	5,659	9,174	0,617	5,659
14,00	7,357	7,203	12,680	0,568	7,203

Según Portillo (2012, p 105) en la determinación del Cd se considera el ajuste lineal entre los caudales observados (Qo) y los caudales teóricos (Qt). En este sentido, como otra forma de obtener el Cd relacionaremos el caudal corregido con el caudal teórico, ajustando a una línea recta la gráfica de los pares (Qc, Qt) mediante el método de regresión. Según la Figura 3 señalando el intercepto de la línea ajustada tenemos:

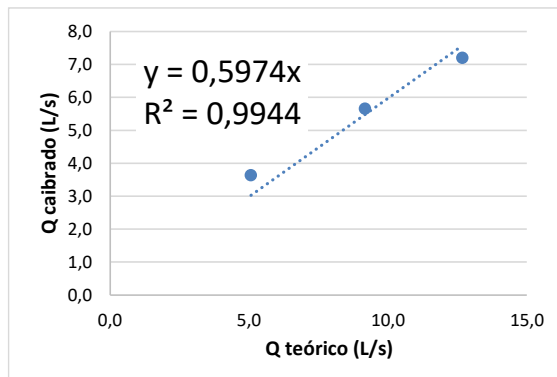


Figura 3. Ajuste lineal para obtener el coeficiente de descarga

El valor del coeficiente de descarga Cd = 0,597 conseguido mediante ajuste lineal en la

Figura 3, nos permite obtener el caudal real ajustado, tal como se muestra en la penúltima columna de la Tabla 5, sin embargo, como es un único valor al ser multiplicado este coeficiente por el caudal teórico y, al no depender directamente de la altura

probablemente no sea el apropiado para representar a un amplio rango de valores de caudal. Esta situación también se encuentra reflejado en un amplio valor de 17,7 % del error relativo, para una altura de carga de 9,7 cm.

Tabla 5. Errores relativos (Er) en caudales obtenidos con diferentes Cd.

H (cm)	Qo (L/s)	Qt (L/s)	Cd f(H)	Qra° (L/s)	Er (%)	Cd f(L)	Qra (L/s)	Er (%)
9,70	3,678	5,07	0,718	3,64	1,2	0,597	3,03	17,7
12,30	5,477	9,17	0,617	5,66	3,3	0,597	5,48	0,1
14,00	7,357	12,68	0,568	7,20	2,1	0,597	7,58	3,0

Análisis de la calibración del vertedero triangular de 74,4°

Los coeficientes de **K** y **n** obtenidos por los métodos de mínimos cuadrados y de regresión tienen los mismos valores, por lo que la ecuación corregida no muestra diferencias de acuerdo con el método de ajuste. Asimismo, en razón de que los coeficientes de descarga Cd resultan menores a la unidad, implica que los valores del caudal teórico siempre serán mayores a los valores de caudal observado para alturas mayores a 1 cm, aunque el caudal ajustado puede resultar levemente mayor al caudal observado, tal como se muestra en la Tabla 5 para una altura de 12,3 cm.

En relación a los caudales reales ajustados de la penúltima columna de la Tabla 5, que se establecen con un único valor de Cd, determinado por el ajuste lineal entre los caudales observados y los caudales teóricos, observamos que estos valores se subestiman a la menor altura (9,20 cm) y sobreestiman a la mayor altura (14 cm) en relación a los valores de caudal real ajustados por el Cd diferenciado (5ta columna de la Tabla 5), incluso en relación a los valores de caudal observados en la segunda columna de la Tabla 5.

En la calibración de vertederos de pared delgada efectuados en laboratorio, Portillo (2012) realiza las medidas de altura de carga a 4 H aguas arriba, situación que resulta difícil en un desarenador si no se dispone de piezómetros que nos permitan medir a una distancia de 4 veces de la altura de carga en la cresta. Sin embargo, Portillo (2012, p 151) resalta la importancia de contar con ecuaciones propias, recomendando calibrar las ecuaciones teóricas.

En consecuencia, en los desarenadores u otras estructuras que incluyen vertederos triangulares, donde es difícil medir la altura de carga

aguas arriba (donde se distingue un flujo uniforme), será recomendable realizar los ensayos, estableciendo las alturas con una regla metálica colocando encima de la misma cresta del vertedero (Figura 4).



Figura 4. Forma de medir en cm. con regla metálica de 30 cm de largo

CONCLUSIONES

Considerando que muchas relaciones son obtenidas en laboratorio, en nuestro caso asumimos como ecuación propia, la relación de tipo potencial, ajustada por el método de mínimos cuadrados (ecuación 3,9) o método de regresión (Figura 2) a partir de los valores observados en campo.

Si se trata de obtener el caudal real multiplicando el caudal teórico por un Cd, es necesario establecer un Cd en función de los coeficientes de ajuste, ángulo y altura de carga, como en la ecuación 3,6 que nos permite reflejar con buena precisión los valores observados en campo.

Como parte de una metodología sencilla será suficiente establecer como mínimo tres alturas cercanas a la altura de carga que se relaciona con el rango de caudal que se maneja o suministra

frecuentemente, aunque si se trata de variar el ingreso de agua para los diferentes usos o sectores donde se requiere menor margen de error (1-3%), será conveniente ampliar las alturas de ensayo hasta un número que nos permita mejorar la precisión o sensibilidad en las medidas.

Es necesario realizar calibraciones en campo para obtener ecuaciones o relaciones matemáticas en donde se emplean unidades de comprensión general, bajo las condiciones de operación frecuente, considerando que en muchos casos las expresiones obtenidas en laboratorio expresan mayores valores a los caudales medidos con relaciones ajustados en campo a través del Cd diferenciado.

BIBLIOGRAFÍA

- Domínguez F. (1999). Hidráulica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Editorial Universitaria. Chile.
- Marbello Pérez, R. (2005). Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21725>
- Portillo España, L. (2012). Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3356_C.pdf
- Salazar E. & Cedillo M. (2017). Validación computacional de vertederos rectangulares y triangulares para generar un modelo nuevo triangular asimétrico, que facilitara la medición de las cargas de estructuras hidráulicas. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca-Ecuador, 2017. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15009/1/UPS-CT007408.pdf>
- Serrano G. (2022). Manual de obras hidráulicas para riego. Universidad Mayor de San Andrés. Primera edición, La Paz-Bolivia.
- Sotelo G., (1994). Hidráulica General Volumen I Fundamentos. Editorial Limusa S.A. Decimoquinta reimpresión. México.