



***GUIA PARA MEDICIÓN DE CAUDALES DE
EFLUENTES INDUSTRIALES***

MVOTMA/DINAMA/DCA/DEA/G002

VERSIÓN 2

28 DE SETIEMBRE DE 2004

Autores (orden alfabético):

Alejandro Oleaga, aoleaga@dinama.gub.uy

Fernando Pacheco, fpacheco@dinama.gub.uy

Lorena Puig, lpuig@dinama.gub.uy

Colaboradores (orden alfabético):

Alejandro Cendón, acendon@dinama.gub.uy

Daniel Vignale, dvignale@dinama.gub.uy

Departamento de Emisiones al Ambiente

División Control Ambiental

Dirección Nacional de Medio Ambiente

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la mejora de la Gestión de Líquidos Residuales Industriales (de modo mas general la mejora de la Gestión de los Recursos Hídricos), a los procedimientos ya establecidos de inspección y muestreo de aguas residuales industriales, se deberá agregar sistemáticamente y con la rigurosidad requerida la tarea de medición de caudales.

Los datos obtenidos permitirán realizar -entre otros- evaluaciones mas precisas: de los sistemas de tratamiento; de las relaciones entre sistemas productivos y su descarga; de la evolución de la relación volumen de producción y descarga de cada emprendimiento; y de las cargas contaminantes en las cuencas involucradas.

El presente trabajo resume¹ aspectos metodológicos teóricos y prácticos para la medición de caudales, basándose en el uso de técnicas de bajo costo, ampliamente utilizadas en instalaciones de tratamiento de líquidos residuales industriales. Asimismo, se exponen conceptos básicos que permiten comprender las variables involucradas y su influencia en la precisión de las determinaciones realizadas.

2 OBJETIVOS Y ALCANCE

La presente guía pretende acercar un conjunto mínimo de información teórica básica, esquemas de cálculo y propuestas de instalaciones de aforo que aseguren una precisión adecuada en las mediciones. Esta propuesta tiene el propósito de que los resultados a obtener presenten un error total inferior al 10%, incluyendo en este, el error experimental (derivado del ajuste de las fórmulas de cálculo) y el incurrido en la lectura de los parámetros intervinientes.

Se describen instalaciones y metodologías de medición que han mostrado ser de gran utilidad y precisión (para asegurar el cumplimiento de los objetivos). No obstante, existen otras opciones de determinación del caudal, no incluidas en esta guía, con precisión igual o mayor que la que se pretende.

3 MEDICIÓN DEL CAUDAL

Definición: Los **dispositivos primarios** son estructuras hidráulicas^{II} calibradas, instaladas en el elemento de conducción del fluido, de modo tal que se puedan obtener mediciones de flujo determinando variables físicas en puntos específicos de la estructura.

Definición: Los **dispositivos secundarios** son elementos que se utilizan en conjunto con los primarios y permiten determinar el flujo real que pasa por el punto de medición. Pueden clasificarse en dos grandes tipos: de lectura directa sin registro o de lectura indirecta desde puntos fijos y de registro digital o gráfico.

La determinación del caudal se puede realizar tanto en conducciones a superficie libre (canales o cañerías a sección parcialmente llena) como en conductos a presión (tuberías a sección completa), con registros instantáneos o continuos. Un sistema continuo y completo de medición de caudales consiste por ejemplo en: un dispositivo primario, un dispositivo secundario de registro digital o gráfico, un equipo de transmisión remota y un totalizador. En el caso de sistemas de medición instantánea los dispositivos secundarios utilizados son del tipo de lectura directa o indirecta y no se cuenta con sistemas de trasmisión ni totalizadores. De esta manera, un sistema de medición instantánea con una estructura primaria adecuada,

¹ La discusión completa de todos los métodos de medición de flujo disponibles y los dispositivos usados está más allá del alcance de esta guía, pero pueden consultarse en la referencia bibliográfica seleccionada.

^{II} Como ejemplos pueden citarse: vertederos, que relacionan el tirante de agua con el flujo, medidor Venturi, que relaciona diferencias de presión con el flujo y el medidor electromagnético, que relaciona el voltaje eléctrico inducido con el flujo.

podrá transformarse en un sistema de medición continua anexándole un dispositivo secundario de registro digital (por ejemplo de medidor de niveles, medidor de presión).

Toda medición de caudal “instantáneo” es representativa únicamente del período involucrado, generalmente corto, por lo cual su valor se expresará en m³/s, l/s, m³/min o l/min. La extrapolación del resultado obtenido a períodos de tiempo mas extensos deberá realizarse con mucha precaución, involucrando aspectos tales como el sistema de tratamiento, niveles de producción, etc., elementos que deberán ser claramente referidos en el análisis.

Conocida la concentración del contaminante y el caudal correspondiente, se puede calcular la carga contaminante de la siguiente manera:

$$M_i = Q_i * C_i$$

Donde, Q_i caudal medido en la inspección (asociado a la muestra recogida) [L³/T];

C_i concentración del parámetro en la muestra recogida (asociado al caudal medido) [M/L³];

M_i Carga correspondiente al parámetro i [M/T];

Observación: A modo de ejemplo, si el caudal medido fue de 10 l/s y la concentración informada por el laboratorio en el parámetro DBO₅²⁰ fue de 55 mg/l, la carga instantánea resultante es de 550 mg DBO₅²⁰/s.

La extrapolación a intervalos mayores de tiempo de la carga instantánea calculada, presenta inconvenientes similares a lo ya indicado para el caudal y deberán justificarse técnicamente.

Los sistemas de medición continua de flujo, pueden conceptualizarse como una serie de mediciones instantáneas a intervalos de tiempos regulares, que permiten reflejar la variabilidad del caudal de descarga con el tiempo. Estos sistemas de medición son necesarios para los muestreos denominados comúnmente compuestos. Los muestreos involucran períodos de tiempo mas extensos en los cuales el volumen de la muestra recogida se “compone” según los caudales de descarga o el tiempo. Aquellos basados en el caudal pueden ser realizados de dos maneras: 1) según el volumen de descarga (por ejemplo una muestra cada 200 m³) y 2) ajustando el volumen de muestra extraído al caudal de descarga calculado. Por último, los basados en el tiempo se realizan con extracciones de muestras a intervalos de tiempo prefijados (por ejemplo 2 muestras por cada hora).

3.1 Vertederos de Pared Delgada

Un vertedero de pared delgada^{III} consiste básicamente de una lámina plana, rígida, colocada perpendicular a la dirección del flujo y al fondo del canal (Figura 1). Son dispositivos sencillos y de bajo costo de construcción y mantenimiento. Presentan un amplio rango de medición, cuyo valor máximo puede ser 20 veces superior al caudal mínimo, manteniendo en todo momento la precisión requerida.

De modo general puede decirse que los vertederos de pared delgada son las instalaciones más adecuadas para la precisa determinación del caudal, ya que el error debido a la relación de descarga y carga varía entre 1 y 3%, mientras que para otros dispositivos primarios es mayor al 3% (vertederos de cresta ancha, Parshall, Palmer- Bowles, etc) [2].

3.1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Los vertederos de pared delgada se diferencian por el tipo o forma de la placa de descarga, (por ejemplo trapezoidal, triangular, rectangular, orificios calibrados, etc.). La elección de la placa obedece a los objetivos del vertedero, la precisión requerida en la medición y las condiciones en la cual funcionarán. Por ello, se describirán únicamente los vertederos de

^{III} Relaciones entre altura del agua sobre el vertedero y espesor de la placa mayores que 15 [4].

tipo rectangular y triangular ya que éstos además de cumplir los requerimientos de precisión pretendidos, son de fácil construcción, robustos y de gran confiabilidad para su uso con líquidos residuales industriales. Asimismo, éstos posiblemente sean los que presentan mayor cantidad de experiencias y estudios respecto de su funcionamiento y control.

El ancho de la cresta, medido perpendicular a la cara de la placa, debe medir entre 1 y 2 mm. La pared de aguas arriba de la placa del vertedero debe ser lisa; la cara de aguas abajo deberá ser cortada en cuña con un ángulo no menor a 45° (Figura 1). Los bordes de la placa del vertedero deberán ser pulidos y perpendiculares a la cara de aguas arriba.

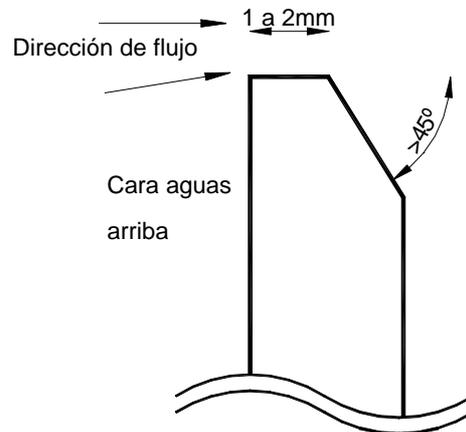


Figura 1.- Detalle del corte de la placa en su extremo superior

Las recomendaciones incluidas en esta guía están basadas en experimentos realizados con caudales entre 0.00023 m³/s y 1.4 m³/s. [3]

3.1.1.1 Fórmula fundamental

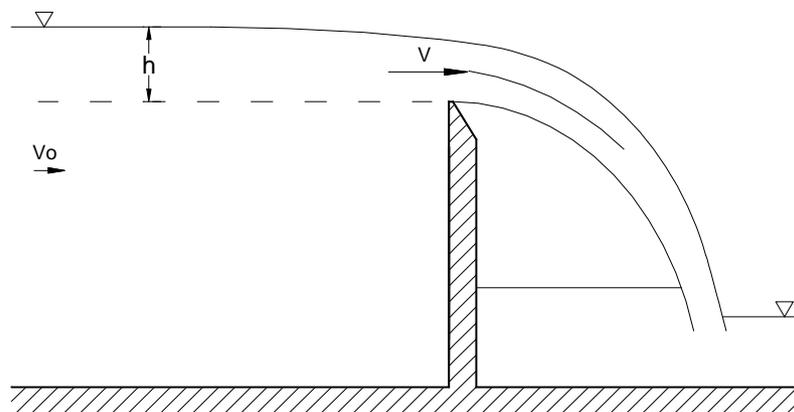


Figura 2.- Esquema de funcionamiento de un vertedero de pared delgada

A partir de desarrollos teóricos se obtiene la siguiente expresión para la velocidad media en la zona de pasaje sobre la placa^{IV}:

$$v = C_v * \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde, v Velocidad media en el pasaje [L/T]

g Aceleración gravitacional (9.8 m/s²) [L/T²]

^{IV} Una explicación mas detallada de los desarrollos teóricos e hipótesis utilizadas se puede consultar en [4] y [5]

- h Nivel del agua en el canal, previo a los efectos de la descarga (medido respecto de la base del vertedero) [L]
- Cv Coeficiente de corrección por las hipótesis asumidas [1]

El pasaje del fluido por el vertedero provoca una contracción del flujo en torno a éste, efecto que puede ser corregido aplicando un coeficiente de contracción a la fórmula anterior. Asimismo, dada la relación existente entre la velocidad media sobre la cresta, el área de pasaje y el flujo total, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = v * S = C_e * S * \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

- Donde,
- Q Caudal sobre la placa [L³/T]
 - v Velocidad media en la sección [L³/T]
 - S Sección transversal de pasaje [L²]
 - g Aceleración gravitacional (9.8 m/s²) [L/T²]
 - h Altura del nivel del agua en el canal medida respecto de la base del vertedero en la zona no afectada por la descarga [L]
 - Ce Coeficiente de descarga (incluye efectos contenidos en Cv, la geometría del sistema y las propiedades dinámicas del agua) [1]

3.1.1.2 Rango de aplicación

Las condiciones de aplicación de las fórmulas indicadas están limitadas a flujo estacionario, con superficie libre y a descarga totalmente ventilada. La contracción del flujo en la zona de descarga es función de las características constructivas de la estructura de aforo (ancho de canal, profundidad, etc.), por lo cual se han determinado experimentalmente^V valores de Ce en función de dichas condiciones, siendo usualmente válidos para el rango de entre 5 y 30 °C.

3.1.1.3 Zona de aproximación

Se denomina **zona de aproximación** a la porción del canal que se extiende desde la placa del vertedero hacia la zona de aguas arriba. La longitud mínima recomendada para esta zona es de 10 veces la altura de la superficie de agua respecto del vértice del vertedero, medida a máximo caudal. Para el cumplimiento de las condiciones experimentales en que se obtuvieron las relaciones de descarga es necesario que en esta zona el canal presente sección uniforme para asegurar un flujo uniformemente distribuido.

Podrán instalarse estructuras reguladoras de flujo para la simulación de distribución normal de velocidades, no obstante, su ubicación deberá ser, con respecto a la placa del vertedero, al menos igual a la longitud de la zona de aproximación. Si el vertedero es colocado dentro de una cámara de aforo su longitud debe ser al menos la del canal de aproximación (ver Anexo 3).

Se recomienda un canal de rectangular en la zona de aproximación; no obstante, una forma distinta es aceptable si las condiciones de flujo totalmente contraído se cumplen.

La forma y el tamaño del canal de aguas abajo del vertedero no debe afectar la descarga, por lo cual debe presentar una sección y pendiente que asegure una descarga ventilada.

^V Francis, Fteley and Stearns, Rehbock, Swiss Society, Frese, Kin, Bazin, referidos en la bibliografía

3.1.1.4 Especificaciones de la instalación

Como se indicó, el canal en la zona de aproximación deberá ser de sección uniforme, el piso deberá ser horizontal y las paredes verticales, debidamente alisados. Será construido de materiales que asegure su durabilidad en las condiciones de funcionamiento y del ambiente que los rodea. La placa será fijada en una pared o tabique perpendicular a la dirección de las paredes laterales, de forma que el flujo sea perpendicular a la sección de pasaje. La fijación deberá ser lo suficientemente resistente como para asegurar la permanencia futura en la posición de diseño y facilitar las tareas de mantenimiento.

3.1.1.5 Medición de la carga

La **sección de medición** deberá estar localizada a suficiente distancia, aguas arriba de la placa, de forma tal que no sea afectada por la zona de descenso producida por el vertedero. Para ello, la medición debe realizarse a una distancia de entre 4 a 5 veces la carga esperada en condiciones de caudal máximo de diseño (Ver Figura 3). La medición consiste en determinar el nivel del agua respecto de la base de la sección de pasaje, debiendo utilizarse para ello una regla graduada o un limnómetro.

3.1.1.6 Mantenimiento

El mantenimiento del vertedero y su canal de aproximación son necesarios a efectos de asegurar las condiciones requeridas de diseño y cálculo. El canal de aproximación se conservará libre de lodos, vegetación y obstrucciones que puedan modificar las condiciones del flujo supuestas.

El canal de aguas abajo debe estar libre de obstrucciones que puedan provocar inundación o inhibir la descarga libre.

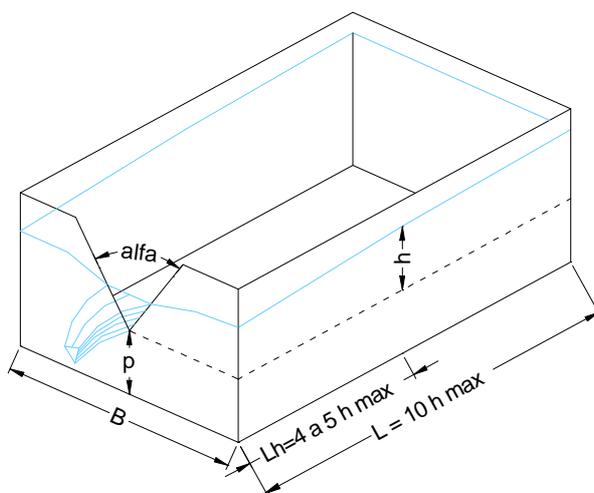
3.1.2 VERTEDEROS TRIANGULARES^{VI}

3.1.2.1 Definición

Un vertedero triangular de pared delgada es una instalación de control que consiste en un canal de aproximación de sección rectangular en cuyo extremo se coloca una placa vertical delgada con una incisión en forma de V sobre la cual circula el flujo (Ver figura 3). Esta se ubicará de forma que su bisectriz esté vertical y equidistante a las paredes del canal.

3.1.2.2 Características de la instalación

Una instalación típica de medición con un vertedero triangular es la siguiente:



^{VI} El vertedero triangular de pared delgada fue introducido por el inglés James Thomson en el año 1859.

Figura 3.- Vertedero triangular, donde: B, ancho del canal; p, altura hasta la base de la sección de pasaje; L, largo mínimo; Lh, distancia a la sección de medición; h, carga a determinar; alfa, ángulo de abertura de la sección de pasaje.

3.1.2.3 Fórmula de Descarga

Considerando la fórmula obtenida en 3.1.1.1 e imponiendo la relación entre área de pasaje y nivel sobre la placa, se obtiene una expresión para el caudal expresado en función del ángulo de la abertura, la altura en la sección de medición y la altura del agua sobre el vértice de la incisión.

$$Q = C_e \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot h_s^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

- Donde, Q Caudal sobre la placa [L³/T]
- α Angulo de la sección de pasaje
- Ce Coeficiente de descarga (incluye efectos contenidos en Cv y contracción del flujo) [1]
- g Aceleración gravitacional (9.8 m/s²) [L/T²]
- h Carga en la sección de medición [L]
- h_s Altura del agua sobre la sección de pasaje [L]

Debido a la dependencia entre h y h_s se han desarrollado fórmulas que permiten estimar el caudal a partir únicamente de una variable (h). Uno de los desarrollos mas utilizados es la fórmula general de descarga de Kindsvater-Shen, la cual es válida para vertederos triangulares de pared delgada, con ángulos entre 20° y 100°, y se puede expresar como:

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h e^{5/2}$$

- Donde: Q Caudal [L³/T]
- C_e Coeficiente de descarga. [1].
- G Aceleración gravitacional (9.8 m/s²) [L/T²]
- α Angulo del vertedero
- h_e= h + K_h Carga efectiva en metros. [L]
- h Carga en la sección de medición [L]
- K_h Coeficiente de corrección por viscosidad [L].

Como se indicó, el coeficiente C_e es función de la relación h/p, p/B y del ángulo α , pudiendo expresarse como:

$$C_e = f\left(\frac{h}{p}, \frac{p}{B}, \alpha\right)$$

De esta manera existen gráficos que permiten calcular el valor de Ce con los datos las siguientes variables: h, p, B, α , como entrada (Figuras 4 y 5).

En base a la revisión de los datos disponibles, Hager en el año 1990 propuso la siguiente fórmula para el cálculo del coeficiente de descarga C_e [8]:

$$C_e = \frac{1}{\sqrt{3}} * \left[1 + \left[\frac{h^2 \cdot \text{tg}(a/2)}{3 \cdot B \cdot (h+p)} \right]^2 \right] * \left[1 + \frac{0.66}{h^{3/2} \cdot \text{tg}(a/2)} \right]$$

dónde la carga h del término dimensional en el segundo paréntesis deberá expresarse en centímetros.

El primer paréntesis tiene en cuenta los efectos de la velocidad de aproximación, mientras que el segundo los efectos de la viscosidad y tensión superficial en descarga con bajos valores de h .

Obteniendo el coeficiente de descarga a partir de la ecuación anterior (Hager) y, luego, empleando la siguiente fórmula general de descarga se puede determinar la descarga a través de un vertedero triangular:

$$Q = C_e * \frac{8}{15} * \text{tg}\left(\frac{a}{2}\right) * \sqrt{2 \cdot g} * h^{5/2}$$

En caso que el área de descarga sea pequeña respecto al área de aproximación del canal, la carga de velocidad en éste es despreciable. Para esta condición, llamada "totalmente contraída" los valores de C_e son función únicamente del ángulo y no de las características del canal de aproximación. En la Figura 4 se muestran valores experimentales de C_e obtenidos en estas condiciones para distintos valores de a .

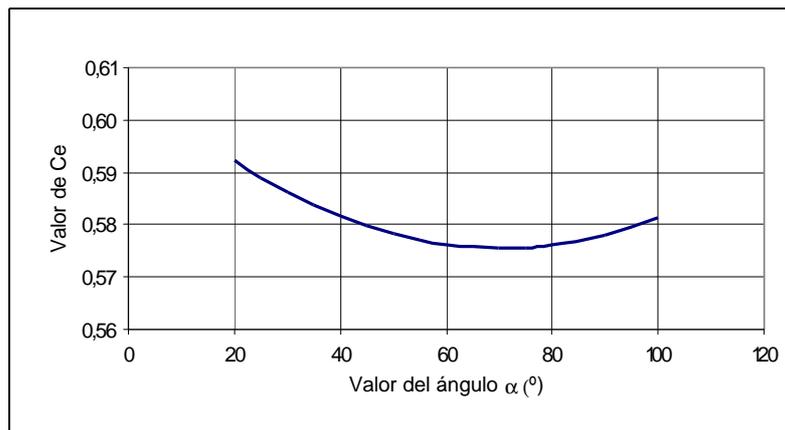


Figura 4.- Relación entre C_e y α para vertederos triangulares funcionando en descarga "totalmente contraída"

Caso particular: Vertederos Triangulares con $a=90^\circ$

Fijada una de las variables de las que depende C_e (en esta caso α), se lo puede graficar en función de las demás. En la Figura 5 se muestran valores experimentales de C_e obtenidos en estas condiciones para distintos valores de h/p y p/B .

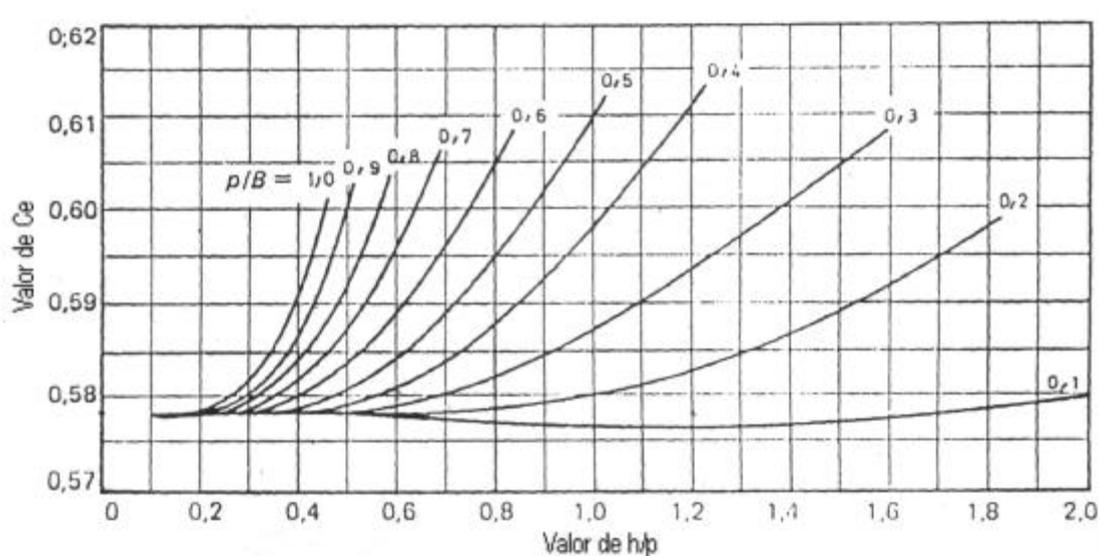


Figura 5.- Valores experimentales de C_e para $\alpha = 90^\circ$

Los estudios realizados para la determinación de la figura 5 indican que “h” y “p” deberán ser mayores a seis y nueve centímetros respectivamente. Para todo el rango de variación de h/p y p/B considerado, la corrección por viscosidad (K_h) es de 0.00085 m.

Introduciendo los valores de las constantes ($g=9.8066 \text{ m/s}^2$ y $\alpha=90^\circ$) en la fórmula general de descarga de Kindsvater-Shen se obtiene:

$$Q = 2.362 \cdot C_e \cdot h_e^{5/2}$$

Donde: Q Caudal [L^3/T].
 C_e Coeficiente de descarga. [1].
 $h_e = h + K_h$ Carga efectiva en metros [L]

Si trabajamos con la ecuación planteada por Hager, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = 2.362 \cdot C_e \cdot h^{5/2}$$

Límites de Aplicación

La fórmula de Kindsvater-Shen es válida en las siguientes condiciones:

- $20^\circ < \alpha < 100^\circ$
- $h/p \leq 1.2$
- $h/B \leq 0.4$
- $p \geq 0.1 \text{ m}$
- $B \geq 0.6 \text{ m}$
- $0.06 \leq h \leq 0.60 \text{ m}$

Condiciones de Aireación

Para evitar que la descarga se adhiera a la placa y mantener la aireación apropiada, el tirante aguas abajo del vertedero deberá estar por lo menos a cinco centímetros debajo del extremo inferior de la placa.

3.1.2.4 Cálculo de Error

Tanto la fórmula de Kindsvater-Shen como otras desarrolladas para estimar el caudal en un vertedero triangular presentan el siguiente formato:

$$Q = A \cdot h^{5/2} ; \quad A = Ce \cdot \frac{8}{15} * \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) * \sqrt{2 \cdot g}$$

A los efectos de estimar el error máximo en que se incurre para el cálculo del caudal, se trabaja por separado analizando en primer término los elementos variables y en segundo término las constantes intervinientes en la fórmula indicada.

Incertidumbre por error en la carga

Aplicando la fórmula de propagación de errores a la fórmula de Kindsvater-Shen, y bajo la hipótesis que no se presenta error en la determinación de los términos incluidos en "A", se obtiene:

$$?Q = \frac{5}{2} \cdot A \cdot h^{3/2} \cdot ?h$$

Por tanto, el error expresado como porcentaje se puede calcular de la siguiente forma:

$$\text{Error}(\%) = \frac{?Q}{Q} = \frac{\left(\frac{5}{2} \cdot A \cdot h^{3/2} \cdot ?h\right)}{A \cdot h^{5/2}} * 100 = \frac{5}{2} \cdot \frac{?h}{h} * 100$$

Asumiendo que el error de medición en campo no debe ser mayor al 6%:

$$\text{Error} = \frac{5}{2} \cdot \frac{?h}{h} \leq 0.06, \text{ entonces } ?h \leq 0.024 h.$$

Dado que, con el instrumento a utilizar para la medición de la carga (regla) solo se puede asegurar que el error en la medición (Δh) es inferior a $\frac{1}{4}$ de centímetro, el nivel mínimo recomendable (h_{\min}) para estas condiciones es 10.4 cm. A partir de este valor se puede seleccionar el tipo de aforo acorde para el rango de caudal a medir^{VII}.

Por ejemplo, para un vertedero triangular de 0.9 m de ancho del canal (B), 90° de abertura y 0.5 m de altura hasta la base de la sección de pasaje (p) (ver Vertedero Tipo A, 90° en el Anexo I) el caudal se calcula de la siguiente forma:

$$Q = Ce * \frac{8}{15} * \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) * \sqrt{2 \cdot g} * h e^{5/2}, \text{ o sea, } Q(m^3/s) = 1.365 * [h(m) + 0.00085]^{5/2},$$

Considerando una altura (h) de 10.4cm (0.104m) se obtiene un caudal de 4.9 l/s (17.5 m³/h), por lo tanto para caudales menores al anterior **no es recomendable** utilizar este tipo de vertedero.

Incertidumbre en las constantes involucradas en la fórmula

^{VII} Observación: A efectos de brindar una herramienta simple para la selección de una estructura de control adecuada, en el Anexo I se presenta un esquema con caudales mínimos y máximos recomendados para diferentes tipos de instalación, ya sea vertedero rectangular o triangular; se incluyen las variables empleadas, las fórmulas de cálculo utilizadas y una gráfica que resume los resultados obtenidos.

Para la consideración del error en los parámetros incluidos en A ($A = Ce \cdot \frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g}$), se analizará independientemente el aporte de Ce y α , dado que la aceleración gravitacional puede ser considerada carente de error^{VIII}.

Error en A:

$$\Delta A(\%) = \frac{\frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{Ce \cdot \frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \Delta Ce + \frac{Ce \cdot \frac{8}{15} \cdot \frac{1}{2 \cdot \cos^2\left(\frac{a}{2}\right)} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{Ce \cdot \frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \Delta a = \frac{\Delta Ce}{Ce} + \frac{\Delta a}{\operatorname{sen}(a)}$$

Debido a que el ángulo puede ser medido con calibre, la precisión puede considerarse de 0.5°, o que representa un error de 1% a 0.5 % para el caso de vertederos triangulares de ángulos de 30° a 90° respectivamente.

El coeficiente Ce surge de experimentos en los cuales se mantienen fijos y muy bien determinados todos los restantes elementos intervinientes en la fórmula, por lo cual su error se debe al error experimental correspondiente. Por ello, el error atribuible a este coeficiente de descarga es menor al 1.0 %.

Error total

Dado que el error máximo a producirse es la suma de los errores de cada parte, y considerando los análisis anteriores, se desprende que el error en el cálculo del caudal es:

$$\text{Error}(\%) = \left(\frac{5}{2} \cdot \frac{?h}{h} + \frac{\Delta Ce}{Ce} + \frac{\Delta a}{\operatorname{sen}(a)} \right) \cdot 100, \text{ por tanto, Error} \leq 6\% + 1\% + 1\% = 8 \%$$

Esto permite asegurar que a partir de un sistema de aforo como los propuestos y adecuadamente construido el error nunca superará al 8%, pudiendo ser inferior aún, dependiendo del rango de funcionamiento y la opción elegida.

3.1.3 VERTEDEROS RECTANGULARES

3.1.3.1 Definición

Un vertedero rectangular de pared delgada es una instalación de control que consiste en un canal de aproximación de sección rectangular en cuyo extremo se coloca una placa vertical delgada, con una incisión rectangular sobre la cual circula el flujo (Ver figura 6). La sección de descarga se ubicará horizontal y equidistante a las paredes del canal.

3.1.3.2 Características de la instalación

Una instalación típica de medición con un vertedero rectangular se muestra en la figura siguiente:

^{VIII} Esta constante ha sido calculada con precisión adecuada para estudios astronómicos, por lo cual se puede disponer de un valor con un error decenas de órdenes de magnitud inferior a la unidad.

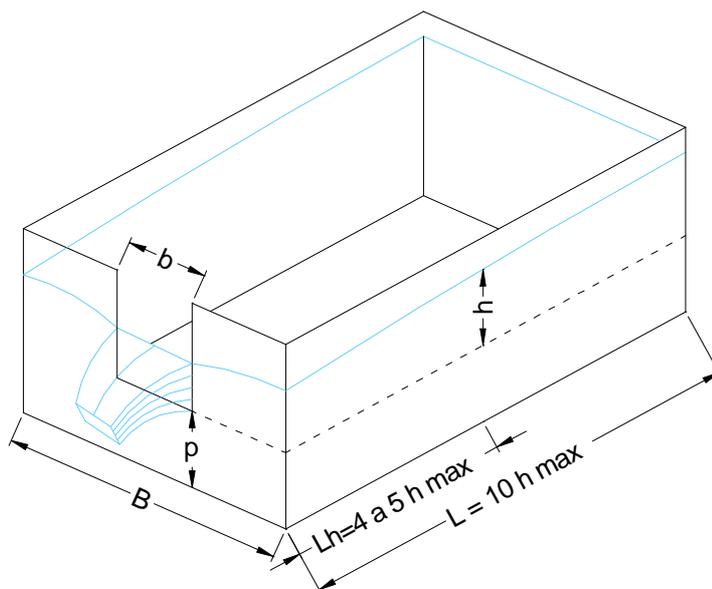


Figura 6.- Vertedero rectangular, donde: B, ancho del canal; p, altura hasta la base de la sección de pasaje; L, largo mínimo; Lh, distancia a la sección de medición; h, carga a determinar; b, ancho de la sección de pasaje.

3.1.3.3 Fórmula de Descarga

A partir de consideraciones similares a las indicadas para vertederos triangulares, se obtienen desarrollos que incluyen una sola variable (h, carga en la sección de medición). Una de los mas utilizados es la fórmula general de descarga de Kindsvater-Shen, la cual es válida para vertederos rectangulares de pared delgada, y se puede expresar como:

$$Q = C_e * \frac{2}{3} * b_e * \sqrt{2 \cdot g} * h_e^{3/2}$$

Donde:	Q	Caudal [L ³ /T].
	C _e	Coefficiente de descarga. [1].
	g	Aceleración gravitacional (9.8 m/s ²) [L/T ²]
	b	Ancho de la sección de pasaje [L]
	h	Carga en la sección de medición [L]
	k _e y K _h	Coefficientes de corrección por viscosidad [L].
	b _e = b + k _e	Ancho efectivo en metros [L].
	h _e = h + K _h	Carga efectiva en metros [L].

Como se indicó, el coeficiente C_e es función de la relación h/p y b/B, pudiendo expresarse como:

$$C_e = f\left(\frac{h}{p}, \frac{b}{B}\right)$$

De esta manera, existen gráficos que permiten calcular el valor de C_e con los datos las siguientes variables: h, p, B, b, como entrada (Figura 7).

Según [8], el coeficiente de descarga C_e puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$C_e = 0.392 + 0.050 \left(\frac{h}{p} + 0.2 \right) \left(\frac{b}{B} \right)^{5/2}$$

Obteniendo el coeficiente de descarga a partir de la ecuación anterior (Hager) y, luego, empleando la siguiente fórmula general se puede determinar la descarga a través de un vertedero rectangular:

$$Q = C_e * b_e * \sqrt{2 \cdot g} * h_e^{3/2}$$

En la Figura 7 se muestran valores experimentales de C_e obtenidos para distintos valores de h/p y b/B .

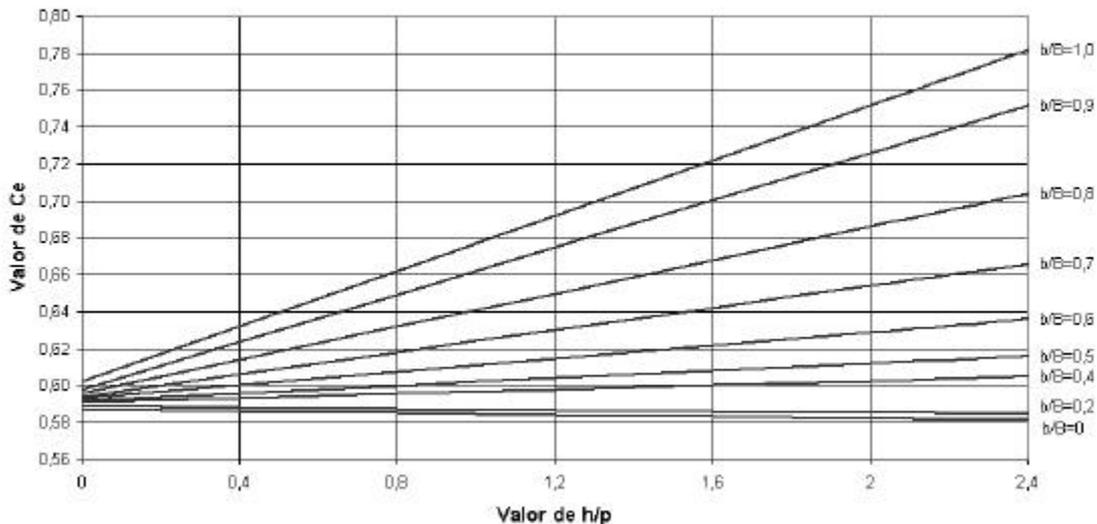


Figura 7.- Gráfico utilizado para el cálculo de C_e a partir de los valores de h/p y b/B

Límites de Aplicación

Las relaciones de descarga dadas en la ecuación de Kindsvater-Shen son aplicables en las siguientes condiciones:

- $h/p \leq 2$
- $h \geq 0.03$ m
- $b \geq 0.15$ m
- $p \geq 0.10$ m

En principio dicha ecuación puede ser aplicada para vertederos muy amplios, no obstante, los experimentos en los que está basada utilizaron valores máximos de 1.2m y 0.6m de ancho de cresta y carga respectivamente.

Condiciones de Aireación

Para evitar que la descarga se adhiera a la placa y mantener la aireación apropiada, el tirante aguas abajo del vertedero deberá estar por lo menos a seis centímetros debajo del extremo inferior de la placa.

3.1.3.4 Cálculo de Error

Tanto la fórmula de Kindsvater-Shen como otras desarrolladas para estimar el caudal en un vertedero rectangular presentan el siguiente formato:

$$Q = A \cdot h^{3/2}, \text{ siendo: } A = C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g}$$

A los efectos de estimar el error máximo en que se incurre para el cálculo del caudal, se trabaja por separado analizando en primer término los elementos variables y en segundo término las constantes intervinientes en la fórmula indicada.

Incertidumbre por error en la carga

Aplicando la fórmula de propagación de errores a la fórmula de Kindsvater-Shen, y bajo la hipótesis que no se presenta error en la determinación de los términos incluidos en "A", se obtiene:

$$?Q = \frac{3}{2} \cdot A \cdot h^{1/2} \cdot ?h$$

Por tanto, el error expresado como porcentaje se puede calcular de la siguiente forma:

$$Error(\%) = \frac{?Q}{Q} = \frac{\left(\frac{3}{2} \cdot A \cdot h^{1/2} \cdot ?h \right)}{A \cdot h^{3/2}} * 100 = \frac{3}{2} \cdot \frac{?h}{h} * 100$$

Asumiendo que el error de medición en campo no puede ser mayor al 6%:

$$Error = \frac{3}{2} \cdot \frac{?h}{h} \leq 0.06, \text{ entonces } ?h \leq 0.04h.$$

Considerando el mismo error admisible para la carga que lo hecho para vertederos triangulares ($\Delta h = 1/4$ cm), el nivel mínimo recomendable (h_{\min}) para estas condiciones es 6.25cm. A partir de este valor se puede seleccionar el tipo de aforo acorde para el rango de caudal a medir^{IX}.

Por ejemplo, para un vertedero rectangular de 0.9 m de ancho del canal (B), 0.25m de abertura (b) y 0.5m de altura hasta la base de la sección de pasaje (p) (ver Vertedero Tipo A, b=25 en el Anexo I) el caudal se calcula de la siguiente forma:

$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h e^{3/2}, \text{ o sea, } Q(m^3 / s) = 0.4389 * [h(m) + 0.001]^{3/2}$$

Considerando una altura (h) de 6.25cm (0.0625m) se obtiene un caudal de siete litros por segundo (7 l/s). Por tanto, para caudales menores al anterior **no es recomendable** utilizar este tipo de vertedero.

Incertidumbre en las constantes involucradas en la fórmula

^{IX} Observación: A efectos de brindar una herramienta práctica para la selección de una estructura de control adecuada al caudal a medir, en el **Anexo I** se presenta un esquema con caudales mínimos y máximos recomendados para diferentes tipos de instalación, ya sea vertedero rectangular o triangular; se incluyen las variables empleadas y las fórmulas para realizar el cálculo de dichos caudales. Además, se presenta un gráfico con los mismos datos.

Para la consideración del error en los parámetros incluidos en A ($A = C_e * \frac{2}{3} * b_e * \sqrt{2 \cdot g}$), se analizará independientemente el aporte de C_e y b_e , dado que la aceleración gravitacional puede ser considerada carente de error^x.

$$\text{Error en A: } \Delta A(\%) = \frac{\frac{2}{3} \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g}} * \Delta C_e + \frac{C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot b_e \cdot \sqrt{2 \cdot g}} * \Delta b_e = \frac{\Delta C_e}{C_e} + \frac{\Delta b_e}{b_e}$$

Debido a que el ancho puede ser medido con calibre, la precisión puede considerarse 0.2mm, lo que representa un error de 0.13% y 0.08% para el caso de vertederos de 15 cm y 25 cm de ancho respectivamente.

El coeficiente C_e surge de experimentos en los cuales se mantienen fijos y muy bien determinados todos los restantes elementos intervinientes en la fórmula, por lo cual su error se debe al error experimental correspondiente. Por ello, el error atribuible a este coeficiente es de: 1.5% cuando se presentan valores de h/p menores a uno, no mayores al 2% para valores de h/p entre 1 y 1.5, y no mayores que el 3% para valores de h/p entre 1.5 y 2.5, por ello, en la mayor parte del rango de funcionamiento de los vertederos rectangulares se presenta un error inferior al 1.5%.

Error total

Dado que el error máximo a producirse es la suma de los errores de cada parte, y considerando los análisis anteriores, se desprende que el error en el cálculo del caudal es:

$$\text{Error}(\%) = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{?h}{h} + \frac{\Delta C_e}{C_e} + \frac{\Delta b_e}{b_e} \right) * 100, \text{ por tanto, Error} \leq 6.00\% + 3.00\% + 0.13\% = 9.13\%$$

Esto permite asegurar que a partir de un sistema de aforo como los propuestos y adecuadamente construido el error no superará el 9.5%, pudiendo ser inferior aún, dependiendo del rango de funcionamiento y la opción elegida.

3.2 Otros Dispositivos de Aforo

A continuación se mencionan brevemente otros dispositivos de aforo para aquellos casos en que la instalación de un vertedero de pared delgada no sea posible.

3.2.1 MEDICIÓN CON RECIPIENTES DE VOLUMEN CONOCIDO

El procedimiento más sencillo es medir el tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. El error que se puede cometer en la medición del tiempo, a lo sumo, es de 0.5 segundo, por tanto el error expresado como porcentaje se puede expresar como:

$$\text{Error}(\%) = \frac{?Q}{Q} = \frac{\frac{V}{t^2} \cdot ?t}{V/t} = \frac{?t}{t}$$

Asumiendo que el error de medición en campo no puede ser mayor al 5%:

$\text{Error} = \frac{?t}{t} \leq 0.05$; entonces $?t \leq 0.05t$. Considerando $?t = 0.5s$, implica que el recipiente a emplear se debe llenar en un tiempo mayor o igual a 10 segundos por el caudal a medir.

^x Esta constante ha sido calculada con precisión adecuada para estudios astronómicos, por lo cual se puede disponer de un valor con un error decenas de órdenes de magnitud inferior a la unidad.

Resultando:

Recipientes de 20 litros hasta caudales de 2 litros/seg

Recipientes de 200 litros hasta caudales de 20 litros/seg.

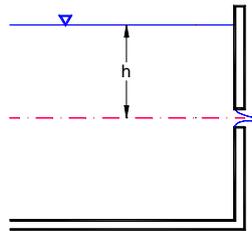
3.2.2 ORIFICIOS

Un orificio es una abertura en la pared de un recipiente. La fórmula general de desagüe para orificios en pared delgada es:

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:	Q	Caudal [L ³ /T].
	μ	Coefficiente [1T].
	S	Sección del orificio [L ²].
	h	Carga [L].

El coeficiente μ varía entre 0.59 y 0.63 según las dimensiones del orificio, solíéndose tomar como aceptable el valor de 0.6. La fórmula es válida siempre que se trate de depósitos de nivel constante y con velocidad de aproximación despreciable, siempre que el diámetro medio del orificio sea “pequeño” con respecto a la profundidad h a la que se haya situado.[7]



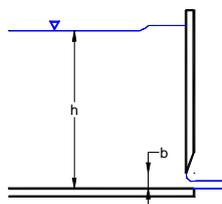
3.2.3 COMPUERTAS

Una compuerta es una estructura hidráulica que permite regular la abertura de la sección de descarga y, por lo tanto, es un caso particular del apartado anterior. La fórmula general de desagüe para el caso de descarga sumergida es:

$$Q = \mu \cdot b \cdot l \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:	Q	Caudal en [L ³ /T].
	μ	Coefficiente [1].
	b	Altura [L].
	l	Ancho [L].
	h	Carga [L].

Para estos dispositivos el coeficiente μ varía entre 0 y 0.70.[7]

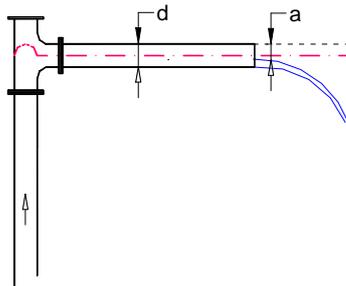


3.2.4 MÉTODO DE CALIFORNIA

Permite medir el caudal a través del extremo de un tubo horizontal parcialmente lleno. El tubo de descarga debe tener por lo menos una longitud de 6 diámetros (d) para que el agua entre sin velocidad apreciable, puede ser corto y abierto en su parte superior para que permita la libre circulación de aire por el tubo horizontal. La fórmula de caudal es [6]:

$$Q = 4.685 \cdot (1 - a/d)^{1.88} \cdot d^{2.48}$$

- Donde:
- Q Caudal [L³/T].
 - A Distancia a la superficie libre en la descarga [L].
 - D Diámetro [L].



4 BIBLIOGRAFÍA

1- ISO 1438/1 - 1980 (E)

Water flow measurement in open channels using weirs and venturi flumes
Part1: Thin-plate weirs

2- ASTM D 5640 - 95

Standard Guide for Selection of Weirs and Flumes for Open-Channel Flow Measurement of Water

3- ASTM D 5242 - 92 (Reapproved 2001)

Standard Test Method for Open-Channel Flow Measurement of Water with Thin-Plate Weirs

4- Hidráulica de Canales Abiertos

Richard H. French
McGraw-Hill, 1988.

5- Hidráulica de Canales Abiertos

Ven Te Chow
McGraw-Hill, 1994.

6- Hidrología Subterránea

E. Custodio, M. R. Llamas
Omega S. A., 1996.

7- Handbook of Hydraulics

King, Horace Williams
Book Company Inc., 1954.

8- Wastewater Hydraulics, Theory and Practice.

Willi H. Hager

5 MODIFICACIONES REALIZADAS A LA VERSIÓN 1

- 1- Sección 3.1.2, pág. 7 - Se incluyó comentario VI.
- 2- Sección 3.1.2.3, págs. 8, 9 y 10 - Se introdujeron las fórmulas de Hager, de C_e y de descarga.
- 3- Sección 3.1.2.4, pág. 11 - Se modificaron las dimensiones de la estructura de Vertedero tipo A descritas en el ejemplo.
- 4- Sección 3.1.3.3, pág. 13 - Se introdujeron las fórmulas de Hager, de C_e y de descarga.
- 5- Sección 3.1.3.4, pág. 15 - Se modificaron las dimensiones de la estructura de Vertedero tipo A descritas en el ejemplo.
- 6- Anexo I, págs. 21, 22 y 23 - Se modificaron las dimensiones de los Vertederos tipo A, descritos en el cuadro, y os valores de caudales para estas estructuras.
- 7- Anexo II, págs. 25 y 26 - Se modificaron los valores de los caudales de los Vertederos tipo A.
- 8- Anexo III, pg. 28 - Se modificó la fórmula utilizada en el ejemplo, y las dimensiones de la estructura planteada.

6 ANEXO I

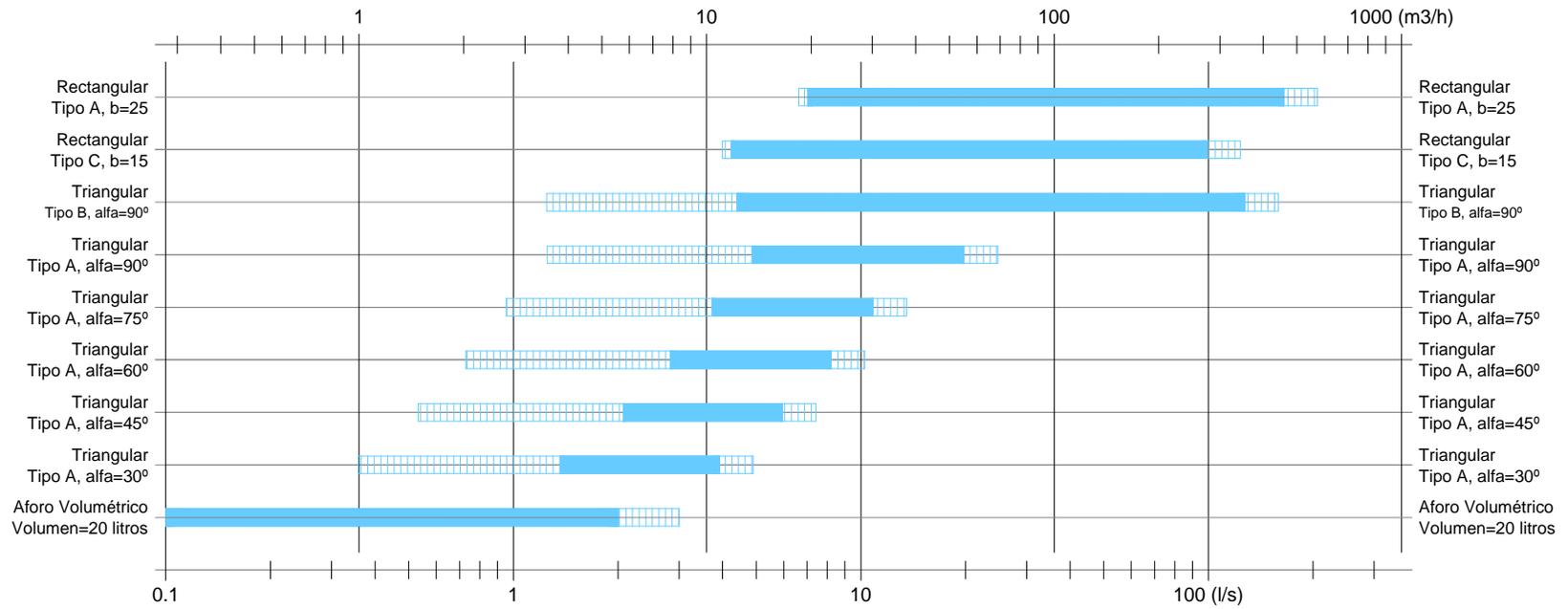
A efectos de brindar una herramienta práctica para la selección de una estructura de control adecuada al caudal a medir, a continuación se presenta un esquema y un gráfico con caudales mínimos y máximos recomendados para distintos tipos de instalación.

Esquema de selección de instalaciones de aforo recomendadas - Memoria de cálculo

Tipo de instalación de aforo	Tipo y Nombre	Dimensiones							Fórmula de cálculo	
		Angulo α (°)	Ancho de vertedero B (m)	Altura base de vertedero p (m)	Ancho de canal B (m)	Largo mínimo de canal L (m)	Distancia de medición Lh (m)	Altura mínima de canal (m)	Vertederos Rectangulares $\dots Q(m^3/s) = Ce * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * g(m/s^2)} * b_e(m) * h_e(m)^{3/2}$	Vertederos Triangulares $\dots Q(m^3/s) = Ce * \frac{8}{15} * \sqrt{2 * g(m/s^2)} * h_e(m)^{5/2}$
Vertedero rectangular	A, b=25	-	0.25	0.5	0.9	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) = [0.589 + 0.005 * (h(m) + 0.001) / 0.5] * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * 9.8} * (0.25 + 0.0026) * (h(m) + 0.001)^{3/2}$ $Q(m^3/s) \cong 0.4398 * [h(m) + 0.001]^{3/2}$	
Vertedero rectangular	C, b=15	-	0.15	0.3	0.6	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) = \left[0.589 + 0.0001 * \frac{(h(m) + 0.001)}{0.3} \right] * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * 9.8} * (0.15 + 0.0025) * (h(m) + 0.001)^{3/2}$ $Q(m^3/s) \cong 0.2651 * [h(m) + 0.001]^{3/2} *$	
Vertedero triangular	B, $\alpha=90^\circ$	90	-	0.6	1.2	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 1.374 * [h(m) + 0.00085]^{5/2} *$	
Vertedero triangular	A, $\alpha=90^\circ$	90	-	0.5	0.9	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 1.365 * [h(m) + 0.00085]^{5/2} *$	
Vertedero triangular	A, $\alpha=75^\circ$	75	-	0.5	0.8	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 1.0436 * [h(m) + 0.0009]^{5/2} *$	
Vertedero triangular	A, $\alpha=60^\circ$	60	-	0.5	0.8	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 0.7866 * [h(m) + 0.0012]^{5/2} *$	
Vertedero triangular	A, $\alpha=45^\circ$	45	-	0.5	0.8	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 0.5673 * [h(m) + 0.0015]^{5/2} *$	
Vertedero triangular	A, $\alpha=30^\circ$	30	-	0.5	0.8	10 h _{max}	4 a 5 h _{max}	0.2 + p + 1.2*h _{max}	$Q(m^3/s) \cong 0.3707 * [h(m) + 0.0022]^{5/2} *$	

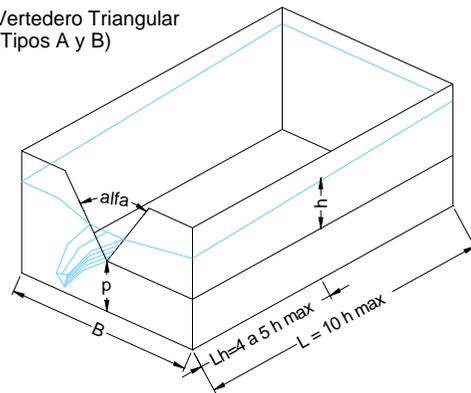
- La fórmula indicada es aproximada dado que el coeficiente de descarga (Ce) varía con la carga (h), pero el error de su aplicación es inferior al 0.5%. En el Anexo II se presentan valores de caudales correspondientes a cada nivel de carga calculados sin realizar la aproximación referida.

Tipo de instalación de aforo	Tipo y Nombre	Altura mínima de operación (cm)	Altura mínima recomendada (cm)	Altura máxima recomendada (cm)	Altura máxima de operación (cm)	Caudal mínimo de operación (l/s) – (m ³ /h)		Caudal mínimo recomendado (l/s) – (m ³ /h)		Caudal máximo recomendado (l/s) – (m ³ /h)		Caudal máximo de operación (l/s) – (m ³ /h)	
Vertedero rectangular	A, b=25	6.0	6.25	51.7	60.0	6.590	23.72	7.002	25.21	165.4	595.6	206.9	744.9
Vertedero rectangular	C, b=15	6.0	6.25	51.7	60.0	3.994	14.38	4.242	15.27	98.87	355.9	123.6	444.8
Vertedero triangular	B, $\alpha=90^\circ$	6.0	10.4	38.0	41.6	1.247	4.488	4.878	17.56	123.9	445.9	155.2	558.8
Vertedero triangular	A, $\alpha=90^\circ$	6.0	10.4	18.3	20.0	1.247	4.488	4.858	17.49	19.81	71.33	24.75	89.10
Vertedero triangular	A, $\alpha=75^\circ$	6.0	10.4	16.0	17.5	0.9552	3.439	3.734	13.44	10.84	39.01	13.54	48.75
Vertedero triangular	A, $\alpha=60^\circ$	6.0	10.4	16.0	17.5	0.7288	2.624	2.835	10.20	8.206	29.54	10.25	36.90
Vertedero triangular	A, $\alpha=45^\circ$	6.0	10.4	16.0	17.5	0.5321	1.915	2.059	7.412	5.946	21.40	7.424	26.73
Vertedero triangular	A, $\alpha=30^\circ$	6.0	10.4	16.0	17.5	0.3577	1.288	1.368	4.925	3.928	14.14	4.900	17.64

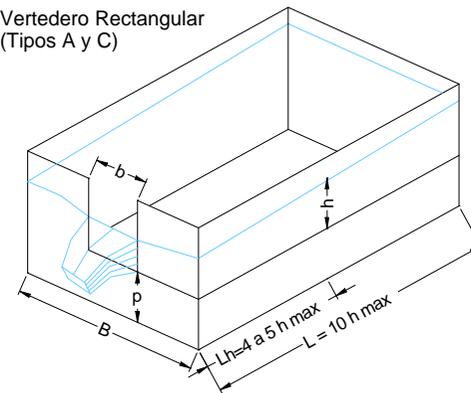


	p (m)	B (m)	b (m)	L (m)
Tipo A	0.5	0.9	0.25	10 h max
Tipo B	0.6	1.2		10 h max
Tipo C	0.3	0.6	0.15	10 h max

Vertedero Triangular (Tipos A y B)

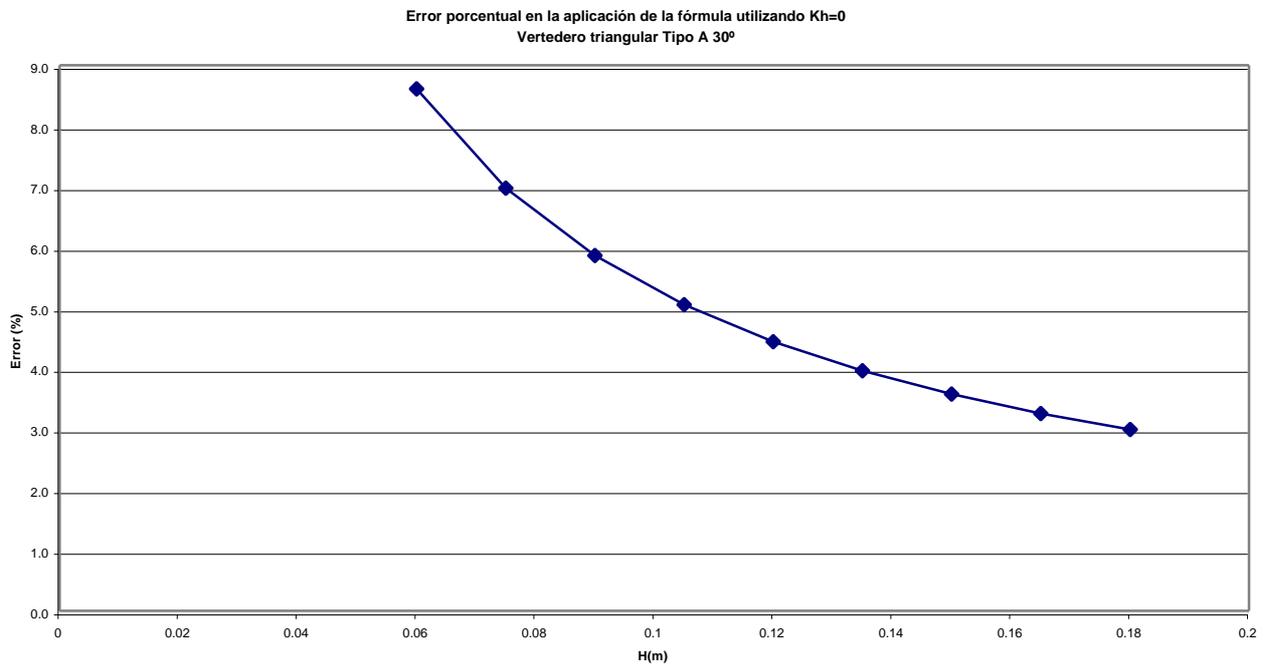


Vertedero Rectangular (Tipos A y C)

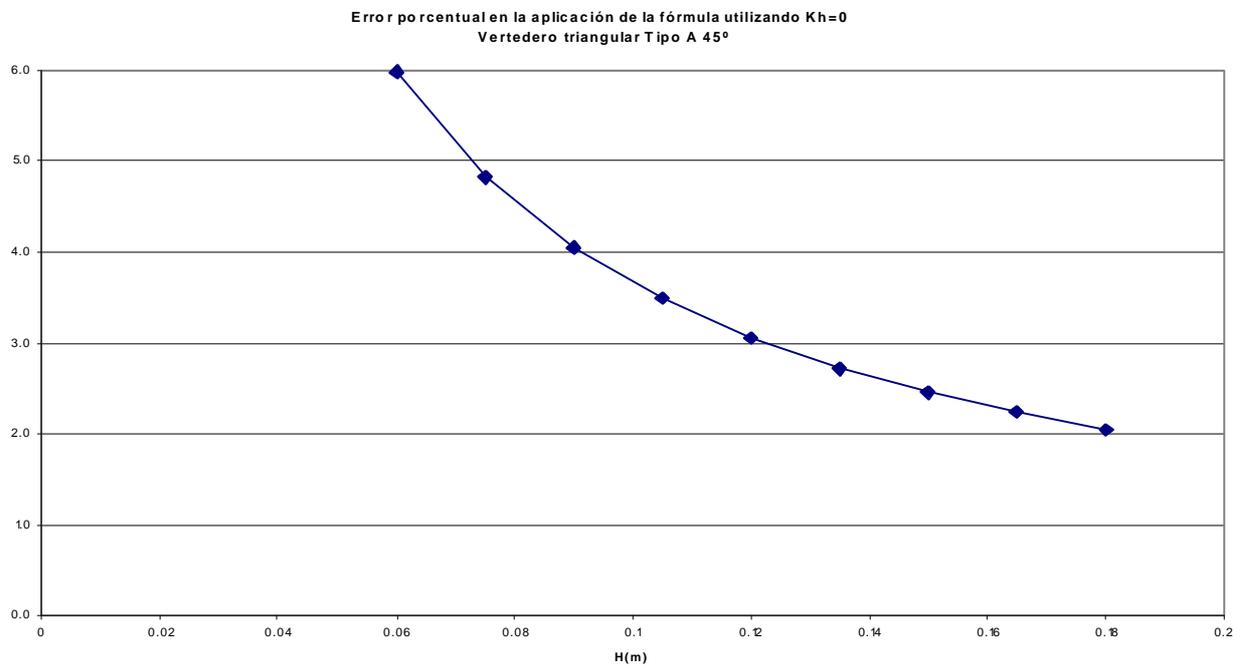


Errores por la no consideración de los efectos de viscosidad (K_h) en las fórmulas de cálculo:

Vertedero Triangular Tipo A 30°



Vertedero Triangular Tipo A 45°



7 ANEXO II

Vertedero triangular 30°		
h (cm)	q (l/s)	q (m3/h)
6.00	0.3577	1.288
6.25	0.3948	1.421
6.50	0.4340	1.562
6.75	0.4755	1.712
7.00	0.5193	1.869
7.25	0.5654	2.036
7.50	0.6139	2.210
7.75	0.6648	2.393
8.00	0.7182	2.586
8.25	0.7741	2.787
8.50	0.8325	2.997
8.75	0.8934	3.216
9.00	0.9570	3.445
9.25	1.023	3.683
9.50	1.092	3.931
9.75	1.164	4.189
10.00	1.238	4.457
10.25	1.315	4.734
10.50	1.395	5.022
10.75	1.478	5.320
11.00	1.563	5.628
11.25	1.652	5.947
11.50	1.743	6.276
11.75	1.838	6.616
12.00	1.935	6.967
12.25	2.036	7.329
12.50	2.139	7.702
12.75	2.246	8.086
13.00	2.356	8.481
13.25	2.469	8.888
13.50	2.585	9.306
13.75	2.704	9.736
14.00	2.827	10.18
14.25	2.953	10.63
14.50	3.082	11.10
14.75	3.215	11.57
15.00	3.351	12.06
15.25	3.490	12.56
15.50	3.633	13.08
15.75	3.779	13.60
16.00	3.928	14.14
16.25	4.081	14.69
16.50	4.238	15.26
16.75	4.398	15.83
17.00	4.562	16.42
17.25	4.729	17.03
17.50	4.900	17.64

Vertedero triangular 45°		
h (cm)	q (l/s)	q (m3/h)
6.00	0.5321	1.915
6.25	0.5878	2.116
6.50	0.6469	2.329
6.75	0.7094	2.554
7.00	0.7754	2.792
7.25	0.8450	3.042
7.50	0.9182	3.305
7.75	0.9951	3.582
8.00	1.076	3.872
8.25	1.160	4.176
8.50	1.248	4.494
8.75	1.340	4.826
9.00	1.437	5.172
9.25	1.537	5.532
9.50	1.641	5.907
9.75	1.749	6.298
10.00	1.862	6.703
10.25	1.979	7.123
10.50	2.100	7.559
10.75	2.225	8.010
11.00	2.355	8.478
11.25	2.489	8.961
11.50	2.628	9.460
11.75	2.771	9.976
12.00	2.919	10.51
12.25	3.071	11.06
12.50	3.229	11.62
12.75	3.390	12.21
13.00	3.557	12.81
13.25	3.729	13.42
13.50	3.905	14.06
13.75	4.086	14.71
14.00	4.272	15.38
14.25	4.464	16.07
14.50	4.660	16.78
14.75	4.861	17.50
15.00	5.068	18.24
15.25	5.279	19.01
15.50	5.496	19.79
15.75	5.718	20.59
16.00	5.946	21.40
16.25	6.179	22.24
16.50	6.417	23.10
16.75	6.660	23.98
17.00	6.909	24.87
17.25	7.164	25.79
17.50	7.424	26.73

Vertedero triangular 60°		
h (cm)	q (l/s)	q (m3/h)
6.00	0.7288	2.624
6.25	0.8055	2.900
6.50	0.8869	3.193
6.75	0.9730	3.503
7.00	1.064	3.830
7.25	1.160	4.176
7.50	1.261	4.539
7.75	1.367	4.920
8.00	1.478	5.320
8.25	1.594	5.739
8.50	1.716	6.177
8.75	1.843	6.635
9.00	1.976	7.113
9.25	2.114	7.610
9.50	2.258	8.128
9.75	2.407	8.666
10.00	2.563	9.226
10.25	2.724	9.806
10.50	2.891	10.41
10.75	3.064	11.03
11.00	3.243	11.68
11.25	3.429	12.34
11.50	3.620	13.03
11.75	3.818	13.75
12.00	4.023	14.48
12.25	4.233	15.24
12.50	4.450	16.02
12.75	4.674	16.83
13.00	4.904	17.66
13.25	5.141	18.51
13.50	5.385	19.39
13.75	5.636	20.29
14.00	5.893	21.21
14.25	6.157	22.17
14.50	6.429	23.14
14.75	6.707	24.14
15.00	6.992	25.17
15.25	7.285	26.23
15.50	7.585	27.31
15.75	7.892	28.41
16.00	8.206	29.54
16.25	8.528	30.70
16.50	8.858	31.89
16.75	9.195	33.10
17.00	9.539	34.34
17.25	9.891	35.61
17.50	10.25	36.90

Vertedero triangular 75°		
h (cm)	q (l/s)	q (m3/h)
6.00	0.9552	3.439
6.25	1.056	3.802
6.50	1.163	4.188
6.75	1.277	4.597
7.00	1.397	5.029
7.25	1.523	5.484
7.50	1.656	5.963
7.75	1.796	6.466
8.00	1.943	6.994
8.25	2.096	7.547
8.50	2.257	8.125
8.75	2.425	8.729
9.00	2.600	9.359
9.25	2.782	10.02
9.50	2.972	10.70
9.75	3.170	11.41
10.00	3.375	12.15
10.25	3.588	12.92
10.50	3.809	13.71
10.75	4.037	14.53
11.00	4.274	15.39
11.25	4.519	16.27
11.50	4.772	17.18
11.75	5.034	18.12
12.00	5.304	19.09
12.25	5.582	20.10
12.50	5.869	21.13
12.75	6.165	22.19
13.00	6.470	23.29
13.25	6.783	24.42
13.50	7.105	25.58
13.75	7.437	26.77
14.00	7.777	28.00
14.25	8.126	29.26
14.50	8.485	30.55
14.75	8.853	31.87
15.00	9.231	33.23
15.25	9.618	34.63
15.50	10.01	36.05
15.75	10.42	37.52
16.00	10.84	39.01
16.25	11.26	40.55
16.50	11.70	42.12
16.75	12.14	43.72
17.00	12.60	45.36
17.25	13.07	47.04
17.50	13.54	48.75

Vertedero triangular 90° tipo A		
h (cm)	q (l/s)	q (m3/h)
6.00	1.247	4.488
6.25	1.379	4.963
6.50	1.519	5.467
6.75	1.667	6.001
7.00	1.823	6.565
7.25	1.989	7.159
7.50	2.162	7.785
7.75	2.345	8.442
8.00	2.537	9.132
8.25	2.737	9.854
8.50	2.947	10.61
8.75	3.166	11.40
9.00	3.395	12.22
9.25	3.634	13.08
9.50	3.882	13.97
9.75	4.140	14.90
10.00	4.408	15.87
10.25	4.686	16.87
10.50	4.975	17.91
10.75	5.274	18.99
11.00	5.583	20.10
11.25	5.903	21.25
11.50	6.234	22.44
11.75	6.576	23.67
12.00	6.929	24.94
12.25	7.293	26.25
12.50	7.668	27.61
12.75	8.055	29.00
13.00	8.453	30.43
13.25	8.862	31.90
13.50	9.283	33.42
13.75	9.716	34.98
14.00	10.161	36.58
14.25	10.618	38.23
14.50	11.087	39.91
14.75	11.568	41.65
15.00	12.062	43.42
15.25	12.568	45.24
15.50	13.09	47.11
15.75	13.62	49.02
16.00	14.16	50.98
16.25	14.72	52.99
16.50	15.29	55.04
16.75	15.87	57.14
17.00	16.47	59.30
17.25	17.08	61.50
17.50	17.71	63.75
17.75	18.35	66.06
18.00	18.98	68.42
18.25	19.68	70.85
18.50	20.36	73.31
18.75	21.06	75.81
19.00	21.77	78.37
19.25	22.49	80.97
19.50	23.23	83.63
19.75	23.98	86.34
20.00	24.75	89.10

Vertedero triangular 90° tipo B		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
6.00	1.247	4.488
6.25	1.379	4.963
6.50	1.519	5.467
6.75	1.667	6.001
7.00	1.823	6.565
7.25	1.989	7.159
7.50	2.162	7.785
7.75	2.345	8.442
8.00	2.537	9.132
8.25	2.737	9.854
8.50	2.947	10.61
8.75	3.166	11.40
9.00	3.395	12.22
9.25	3.634	13.08
9.50	3.882	13.97
9.75	4.140	14.90
10.00	4.408	15.87
10.25	4.686	16.87
10.50	4.975	17.91
10.75	5.274	18.99
11.00	5.583	20.10
11.25	5.903	21.25
11.50	6.234	22.44
11.75	6.576	23.67
12.00	6.929	24.94
12.25	7.293	26.25
12.50	7.668	27.61
12.75	8.055	29.00
13.00	8.453	30.43
13.25	8.862	31.90
13.50	9.283	33.42
13.75	9.716	34.98
14.00	10.16	36.58
14.25	10.62	38.23
14.50	11.09	39.91
14.75	11.57	41.65
15.00	12.06	43.42
15.25	12.57	45.24
15.50	13.09	47.11
15.75	13.62	49.02
16.00	14.16	50.98
16.25	14.72	52.99
16.50	15.29	55.04
16.75	15.87	57.13
17.00	16.47	59.28
17.25	17.08	61.47
17.50	17.70	63.71
17.75	18.33	66.00
18.00	18.98	68.34
18.25	19.65	70.72
18.50	20.32	73.16
18.75	21.01	75.64
19.00	21.72	78.18
19.25	22.43	80.76
19.50	23.17	83.40
19.75	23.91	86.09
20.00	24.67	88.83
20.25	25.45	91.62
20.50	26.24	94.46
20.75	27.04	97.35
21.00	27.86	100.3
21.25	28.69	103.3
21.50	29.54	106.3
21.75	30.40	109.5
22.00	31.28	112.6
22.25	32.18	115.8
22.50	33.08	119.1
22.75	34.01	122.4
23.00	34.94	125.8
23.25	35.90	129.2
23.50	36.87	132.7
23.75	37.85	136.3

Vertedero triangular 90° tipo B		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
24.00	38.85	139.9
24.25	39.87	143.5
24.50	40.90	147.2
24.75	41.95	151.0
25.00	43.01	154.8
25.25	44.09	158.7
25.50	45.19	162.7
25.75	46.38	167.0
26.00	47.51	171.0
26.25	48.66	175.2
26.50	49.82	179.3
26.75	51.00	183.6
27.00	52.19	187.9
27.25	53.41	192.3
27.50	54.64	196.7
27.75	55.88	201.2
28.00	57.15	205.7
28.25	58.43	210.3
28.50	59.72	215.0
28.75	61.14	220.1
29.00	62.48	224.9
29.25	63.83	229.8
29.50	65.20	234.7
29.75	66.58	239.7
30.00	67.99	244.8
30.25	69.41	249.9
30.50	70.85	255.1
30.75	72.30	260.3
31.00	73.91	266.1
31.25	75.40	271.4
31.50	76.91	276.9
31.75	78.58	282.9
32.00	80.13	288.5
32.25	81.70	294.1
32.50	83.29	299.8
32.75	84.90	305.6
33.00	86.67	312.0
33.25	88.32	317.9
33.50	89.98	323.9
33.75	91.67	330.0
34.00	93.37	336.1
34.25	95.09	342.3
34.50	96.83	348.6
34.75	98.59	354.9
35.00	100.4	361.3
35.25	102.2	367.8
35.50	104.0	374.3
35.75	105.8	380.9
36.00	107.9	388.3
36.25	109.7	395.1
36.50	111.6	401.9
36.75	113.6	408.8
37.00	115.5	415.8
37.25	117.6	423.5
37.50	119.6	430.6
37.75	121.6	437.8
38.00	123.6	445.1
38.25	125.7	452.5
38.50	127.7	459.9
38.75	130.0	468.2
39.00	132.1	475.7
39.25	134.3	483.4
39.50	136.4	491.1
39.75	138.8	499.7
40.00	141.0	507.6
40.25	143.2	515.6
40.50	145.7	524.5
40.75	147.9	532.6
41.00	150.2	540.8
41.25	152.5	549.0
41.50	154.8	557.4

Vertedero Rectangular tipo A		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
6.00	6.590	23.72
6.25	7.002	25.21
6.50	7.421	26.72
6.75	7.849	28.26
7.00	8.285	29.83
7.25	8.729	31.42
7.50	9.179	33.04
7.75	9.638	34.70
8.00	10.10	36.50
8.25	10.58	38.08
8.50	11.06	39.80
8.75	11.55	41.56
9.00	12.04	43.34
9.25	12.54	45.15
9.50	13.05	46.97
9.75	13.58	48.83
10.00	14.08	50.71
10.25	14.61	52.61
10.50	15.15	54.54
10.75	15.69	56.48
11.00	16.24	58.46
11.25	16.79	60.45
11.50	17.35	62.47
11.75	17.92	64.50
12.00	18.49	66.56
12.25	19.07	68.65
12.50	19.65	70.75
12.75	20.24	72.87
13.00	20.84	75.02
13.25	21.44	77.19
13.50	22.05	79.37
13.75	22.66	81.58
14.00	23.28	83.81
14.25	23.91	86.06
14.50	24.54	88.33
14.75	25.17	90.61
15.00	25.81	92.92
15.25	26.47	95.28
15.50	27.14	97.69
15.75	27.81	100.1
16.00	28.48	102.5
16.25	29.15	104.9
16.50	29.82	107.3
16.75	30.50	109.8
17.00	31.19	112.3
17.25	31.88	114.8
17.50	32.57	117.3
17.75	33.27	119.8
18.00	33.98	122.3
18.25	34.68	124.9
18.50	35.40	127.4
18.75	36.12	130.0
19.00	36.84	132.6
19.25	37.57	135.3
19.50	38.31	137.9
19.75	39.05	140.6
20.00	39.79	143.2
20.25	40.53	145.9
20.50	41.28	148.6
20.75	42.04	151.3
21.00	42.80	154.1
21.25	43.56	156.8
21.50	44.33	159.6
21.75	45.11	162.4
22.00	45.89	165.2
22.25	46.67	168.0
22.50	47.34	170.9
22.75	48.25	173.7
23.00	49.05	176.6
23.25	49.85	179.5
23.50	50.65	182.4
23.75	51.47	185.3
24.00	52.28	188.2
24.25	53.10	191.2
24.50	53.92	194.1
24.75	54.75	197.1
25.00	55.58	200.1
25.25	56.42	203.1
25.50	57.26	206.1
25.75	58.10	209.2
26.00	58.95	212.2
26.25	59.80	215.3
26.50	60.66	218.4
26.75	61.52	221.5
27.00	62.38	224.6
27.25	63.25	227.7
27.50	64.12	230.8
27.75	65.00	234.0
28.00	65.88	237.2

Vertedero Rectangular tipo A		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
28.25	66.76	240.3
28.50	67.65	243.5
28.75	68.54	246.8
29.00	69.44	250.0
29.25	70.34	253.2
29.50	71.24	256.5
29.75	72.15	259.7
30.00	73.06	263.0
30.25	73.98	266.3
30.50	74.90	269.6
30.75	75.82	272.9
31.00	76.74	276.3
31.25	77.68	279.6
31.50	78.61	283.0
31.75	79.55	286.4
32.00	80.49	289.8
32.25	81.44	293.2
32.50	82.39	296.6
32.75	83.34	300.0
33.00	84.30	303.5
33.25	85.26	306.9
33.50	86.22	310.4
33.75	87.19	313.9
34.00	88.16	317.4
34.25	89.14	320.9
34.50	90.11	324.4
34.75	91.15	328.2
35.00	92.09	331.5
35.25	93.08	335.1
35.50	94.08	338.7
35.75	95.08	342.3
36.00	96.08	345.9
36.25	97.09	349.5
36.50	98.09	353.1
36.75	99.10	356.8
37.00	100.1	360.4
37.25	101.1	364.1
37.50	102.2	367.8
37.75	103.2	371.4
38.00	104.2	375.1
38.25	105.2	378.9
38.50	106.3	382.6
38.75	107.3	386.3
39.00	108.4	390.1
39.25	109.4	393.8
39.50	110.4	397.6
39.75	111.5	401.4
40.00	112.6	405.2
40.25	113.6	409.0
40.50	114.7	412.8
40.75	115.7	416.7
41.00	116.8	420.5
41.25	117.9	424.4
41.50	119.0	428.2
41.75	120.0	432.1
42.00	122.2	439.9
42.25	123.3	443.8
42.50	124.4	447.7
42.75	123.6	444.9
43.00	125.5	451.7
43.25	126.6	455.6
43.50	127.7	459.6
43.75	128.8	463.5
44.00	129.9	467.5
44.25	131.0	471.5
44.50	132.1	475.5
44.75	133.2	479.5
45.00	134.4	483.7
45.25	135.4	487.6
45.50	136.7	491.6
45.75	137.7	495.7
46.00	138.8	499.8
46.25	140.0	503.8
46.50	141.1	507.9
46.75	142.2	512.0
47.00	143.4	516.1
47.25	144.5	520.3
47.50	145.7	524.4
47.75	146.8	528.6
48.00	148.0	532.7
48.25	149.1	536.9
48.50	150.3	541.1
48.75	151.5	545.3
49.00	152.6	549.5
49.25	153.8	553.7
49.50	155.0	557.9
49.75	156.2	562.2
50.00	157.3	566.4
50.25	158.5	570.7

Vertedero Rectangular tipo A		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
50.50	159.7	574.9
50.75	160.9	579.2
51.00	162.1	583.5
51.25	163.3	587.8
51.50	164.5	592.1
51.75	165.7	596.4
52.00	166.9	600.8
52.25	168.1	605.1
52.50	169.3	609.5
52.75	170.5	613.8
53.00	171.7	618.2
53.25	172.9	622.6
53.50	174.2	627.0
53.75	175.4	631.4
54.00	176.6	635.8
54.25	177.8	640.2
54.50	179.1	

Vertedero Rectangular tipo C		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
6.00	3.994	14.38
6.25	4.242	15.27
6.50	4.495	16.18
6.75	4.753	17.11
7.00	5.015	18.06
7.25	5.283	19.02
7.50	5.554	20.00
7.75	5.831	20.99
8.00	6.112	22.00
8.25	6.397	23.03
8.50	6.686	24.07
8.75	6.980	25.13
9.00	7.278	26.20
9.25	7.579	27.29
9.50	7.885	28.39
9.75	8.196	29.50
10.00	8.509	30.63
10.25	8.827	31.78
10.50	9.149	32.94
10.75	9.475	34.11
11.00	9.804	35.29
11.25	10.14	36.49
11.50	10.47	37.71
11.75	10.81	38.93
12.00	11.16	40.17
12.25	11.51	41.42
12.50	11.86	42.69
12.75	12.21	43.96
13.00	12.57	45.25
13.25	12.93	46.55
13.50	13.30	47.87
13.75	13.66	49.19
14.00	14.04	50.53
14.25	14.41	51.88
14.50	14.79	53.24
14.75	15.17	54.62
15.00	15.56	56.00
15.25	15.94	57.40
15.50	16.33	58.80
15.75	16.73	60.22
16.00	17.13	61.65
16.25	17.53	63.10
16.50	17.93	64.55
16.75	18.34	66.01
17.00	18.75	67.49
17.25	19.16	68.97
17.50	19.57	70.47
17.75	19.99	71.98
18.00	20.41	73.49
18.25	20.84	75.02
18.50	21.27	76.56
18.75	21.70	78.11
19.00	22.13	79.67
19.25	22.57	81.24
19.50	23.00	82.81
19.75	23.45	84.40
20.00	23.89	86.00
20.25	24.34	87.61
20.50	24.79	89.23
20.75	25.24	90.86
21.00	25.69	92.50
21.25	26.15	94.15
21.50	26.61	95.81
21.75	27.08	97.48
22.00	27.54	99.15
22.25	28.01	100.8
22.50	28.48	102.5
22.75	28.96	104.2
23.00	29.43	106.0
23.25	29.91	107.7
23.50	30.39	109.4
23.75	30.88	111.2
24.00	31.37	112.9
24.25	31.85	114.7
24.50	32.35	116.4
24.75	32.84	118.2
25.00	33.34	120.0
25.25	33.84	121.8
25.50	34.34	123.6
25.75	34.84	125.4
26.00	35.35	127.3
26.25	35.86	129.1
26.50	36.37	130.9
26.75	36.88	132.8
27.00	37.40	134.6
27.25	37.92	136.5
27.50	38.44	138.4
27.75	38.96	140.3
28.00	39.49	142.2

Vertedero Rectangular tipo C		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
28.25	40.02	144.1
28.50	40.55	146.0
28.75	41.08	147.9
29.00	41.62	149.8
29.25	42.15	151.8
29.50	42.69	153.7
29.75	43.24	155.6
30.00	43.78	157.6
30.25	44.33	159.6
30.50	44.87	161.5
30.75	45.43	163.5
31.00	45.98	165.5
31.25	46.53	167.5
31.50	47.09	169.5
31.75	47.65	171.5
32.00	48.21	173.6
32.25	48.78	175.6
32.50	49.35	177.6
32.75	49.91	179.7
33.00	50.49	181.7
33.25	51.06	183.8
33.50	51.63	185.9
33.75	52.21	188.0
34.00	52.79	190.0
34.25	53.37	192.1
34.50	53.96	194.2
34.75	54.54	196.3
35.00	55.13	198.5
35.25	55.72	200.6
35.50	56.31	202.7
35.75	56.91	204.9
36.00	57.50	207.0
36.25	58.10	209.2
36.50	58.70	211.3
36.75	59.30	213.5
37.00	59.91	215.7
37.25	60.51	217.9
37.50	61.12	220.0
37.75	61.73	222.2
38.00	62.35	224.4
38.25	62.96	226.7
38.50	63.58	228.9
38.75	64.20	231.1
39.00	64.82	233.3
39.25	65.44	235.6
39.50	66.06	237.8
39.75	66.69	240.1
40.00	67.32	242.3
40.25	67.95	244.6
40.50	68.58	246.9
40.75	69.22	249.2
41.00	69.85	251.5
41.25	70.49	253.8
41.50	71.13	256.1
41.75	71.77	258.4
42.00	72.42	260.7
42.25	73.06	263.0
42.50	73.71	265.4
42.75	74.36	267.7
43.00	75.01	270.0
43.25	75.67	272.4
43.50	76.32	274.8
43.75	76.98	277.1
44.00	77.64	279.5
44.25	78.30	281.9
44.50	78.96	284.3
44.75	79.63	286.7
45.00	80.29	289.1
45.25	80.96	291.5
45.50	81.63	293.9
45.75	82.31	296.3
46.00	82.98	298.7
46.25	83.66	301.2
46.50	84.33	303.6
46.75	85.01	306.0
47.00	85.69	308.5
47.25	86.38	311.0
47.50	87.06	313.4
47.75	87.75	315.9
48.00	88.44	318.4
48.25	89.13	320.9
48.50	89.82	323.4
48.75	90.51	325.9
49.00	91.21	328.4
49.25	91.91	330.9
49.50	92.61	333.4
49.75	93.31	335.9
50.00	94.01	338.4
50.25	94.72	341.0

Vertedero Rectangular tipo C		
h (cm)	q (l/s)	q (m ³ /h)
50.50	95.42	343.5
50.75	96.13	346.1
51.00	96.84	348.6
51.25	97.55	351.2
51.50	98.26	353.8
51.75	98.98	356.3
52.00	99.70	358.9
52.25	100.4	361.5
52.50	101.1	364.1
52.75	101.9	366.7
53.00	102.6	369.3
53.25	103.3	371.9
53.50	104.0	374.5
53.75	104.8	377.1
54.00	105.5	379.8
54.25	106.2	382.4
54.50	107.0	385.0
54.75	107.7	387.7
55.00	108.4	390.3
55.25	109.2	393.0
55.50	109.9	395.7
55.75	110.7	398.3
56.00	111.4	401.0
56.25	112.1	403.7
56.50	112.9	406.4
56.75	113.6	409.1
57.00	114.4	411.8
57.25	115.1	414.5
57.50	115.9	417.2
57.75	116.6	419.9
58.00	117.4	422.7
58.25	118.2	425.4
58.50	118.9	428.1
58.75	119.7	430.9
59.00	120.4	433.6
59.25	121.2	436.4
59.50	122.0	439.1
59.75	122.7	441.9
60.00	123.5	444.7

8 ANEXO III

8.1 Ejemplo de Construcción de un Vertedero

Elegimos un caudal máximo de 10 l/seg, para éste se recomiendan varias instalaciones (ver Anexo 1), seleccionado el vertedero triangular rectangular tipo A:

se calcula $h_{m\acute{a}x}$ a partir de la fórmula Kindsvater-Shen:

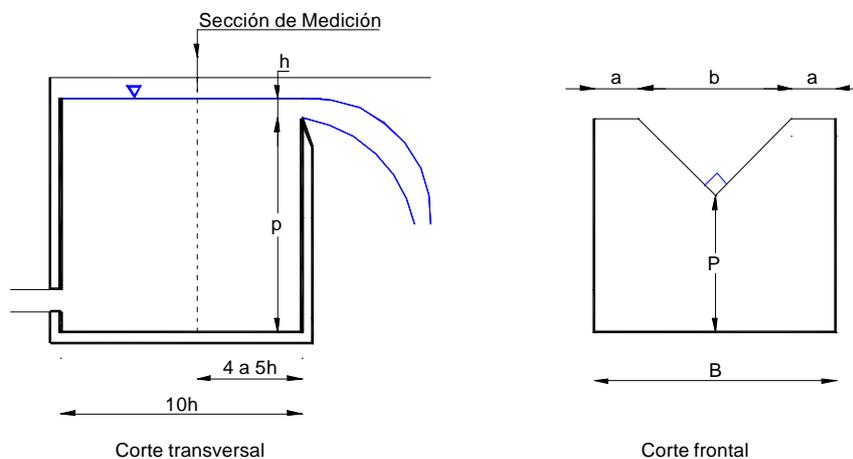
$$Q = Ce * \frac{8}{15} * \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) * \sqrt{2 \cdot g} * h e^{52}$$

el valor de $h_{m\acute{a}x}$ obtenido es: 14 cm (se puede obtener de la tabla correspondiente del Anexo 2).

Utilizando los datos del Anexo 1 obtenemos:

- o La cámara para este vertedero tiene una longitud de 1.40 m (10 x $h_{m\acute{a}x}$).
- o La sección de medición se debe ubicar como mínimo a 76 cm aguas arriba del vertedero (4 $h_{m\acute{a}x}$).
- o La altura del vertedero aguas arriba p: 50 cm (tipo A), y la altura total mínima del canal será de aproximadamente 90 cm (0.2+p+1.2 $h_{m\acute{a}x}$).
- o El ancho de la cámara B: 90 cm (tipo A).
- o Dado que el ancho (b) del vertedero es 28 cm, el valor de a será 31 cm.

En la siguiente figura se observan los detalles el vertedero:



1	INTRODUCCIÓN	3
2	OBJETIVOS Y ALCANCE	3
3	MEDICIÓN DEL CAUDAL	3
3.1	VERTEDEROS DE PARED DELGADA	4
3.1.1	<i>Consideraciones generales</i>	4
3.1.1.1	Fórmula fundamental	5
3.1.1.2	Rango de aplicación	6
3.1.1.3	Zona de aproximación	6
3.1.1.4	Especificaciones de la instalación	7
3.1.1.5	Medición de la carga	7
3.1.1.6	Mantenimiento	7
3.1.2	<i>Vertederos triangulares</i>	7
3.1.2.1	Definición	7
3.1.2.2	Características de la instalación	7
3.1.2.3	Fórmula de Descarga	8
3.1.2.4	Cálculo de Error	11
3.1.3	<i>Vertederos rectangulares</i>	12
3.1.3.1	Definición	12
3.1.3.2	Características de la instalación	12
3.1.3.3	Fórmula de Descarga	13
3.1.3.4	Cálculo de Error	15
3.2	OTROS DISPOSITIVOS DE AFORO	16
3.2.1	<i>Medición con recipientes de volumen conocido</i>	16
3.2.2	<i>Orificios</i>	17
3.2.3	<i>Compuertas</i>	17
3.2.4	<i>Método de California</i>	18
4	BIBLIOGRAFÍA	19
5	MODIFICACIONES REALIZADAS A LA VERSIÓN 1	20
6	ANEXO I	21
7	ANEXO II	25
8	ANEXO III	28
8.1	EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE UN VERTEDERO	28