

# Aforador y distribuidor de caudal de orificio circular en tratamiento de agua

## Gauge and distributor of circular orifice flow in water treatment

Haimar Ariel Vega Serrano<sup>1</sup>, José Ernesto Torres<sup>2</sup>, Miguel Orlando Durán Rangel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Libre Seccional Socorro, [haimar.vega@unilibre.edu.co](mailto:haimar.vega@unilibre.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, [jesuse.torresq@unilibrebog.edu.co](mailto:jesuse.torresq@unilibrebog.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad Libre Seccional Socorro, [migueldisena@hotmail.com](mailto:migueldisena@hotmail.com)

Fecha de recepción: 05/08/2018 Fecha de aceptación: 10/12/2018



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1354>

**Como citar:** Vega Serrano, H. A., Torres, J. E. & Durán Rangel, M. O. (2018). Aforador y distribuidor de caudal de orificio circular en tratamiento de agua. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 150-170. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1354>

## Resumen

La medición y distribución de caudal inferior a 100 ml/s se dificulta por las reducidas dimensiones implicadas para construir la unidad y garantizar uniformidad, situación presente en sistemas piloto o a escala. El objetivo fue determinar la precisión en la medición de caudal mediante un orificio circular como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de agua. Se realizaron pruebas con orificios circulares de flujo libre construidos en tuberías midiendo el caudal de forma volumétrica y la carga hidráulica con piezómetro. La ecuación obtenida mediante regresión lineal múltiple para calcular el caudal de salida por el orificio tiene una correlación de 1 y una precisión promedio del 97.1% con desviación estándar de 2.1, y para el caso de descarga desde un tanque, la precisión es del 96.4% y desviación del 1.8. Con las ecuaciones obtenidas para predecir el caudal respecto de la carga hidráulica y el diámetro del orificio es posible medir el flujo con una precisión superior al 95% para caudales inferiores a 135 m/s haciendo del artículo una herramienta para diseño de dispositivos hidráulicos de medición y distribución de caudal.

**Palabras clave:** Carga hidráulica, distribución y dispersión de caudal, coeficiente de descarga.

## Abstract

The measurement and distribution of flow less than 100 ml/s is hindered by the small dimensions involved in building the unit and guaranteeing uniformity, a situation present in pilot or scale systems. The objective was to determine the precision in the measurement of flow through a circular orifice as an alternative for water purification and treatment systems. Tests were carried out with free-flowing circular holes built in pipes measuring volumetric flow and hydraulic load with piezometer. The equation obtained by multiple linear regression to calculate the output flow through the orifice has a correlation of one and an average precision of 97.1% with standard deviation of 2.1 and for the case of discharge from a tank the precision is of 96.4% and deviation of the 1.8. The equations obtained to predict the flow rate with respect to the hydraulic load and the diameter of the hole, it is possible to measure the flow with a precision higher than 95% for flow rates lower than 135ml/s making the article a tool for the design of hydraulic measuring devices and distribution of flow.

**Keywords:** Discharge coefficient, flow distribution and dispersion, hydraulic load

## 1. Introducción

La medición del flujo es de vital importancia en la gestión del recurso hídrico tanto en la conservación de las fuentes hídricas como en los casos que se debe potabilizar para hacerla apta para el consumo humano, también para tratar aguas residuales agroindustriales con el objetivo de disminuir el impacto negativo en los cauces donde son vertidas.

En los sistemas de potabilización y tratamiento de aguas residuales, se requieren utilizar unidades piloto para modelar el comportamiento hidráulico y la medición de indicadores de calidad y contaminación del recurso hídrico. Un caso en que se tiene la necesidad es en el sistema de filtración en múltiples etapas FiME con caudales de operación entre 20 y 30 ml/s y también el sistema de tratamiento de aguas residuales del café con caudales alrededor de 6 ml/s en los

reactores anaerobios del sistema y de 10 ml/s para el reactor UASB.

La ecuación teórica para obtener el caudal de salida a través de un orificio de pared delgada con flujo libre es conocida como el principio de Torricelli quien la propuso y según [1] es:

$$Q = C_d \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gH} \quad (1).$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga y depende del número de Reynolds, debe obtenerse de figuras en escala logarítmica.  $H$  es la carga hidráulica sobre el orificio.  $D$  es el diámetro del orificio.

### 1.1 Planteamiento del problema

En las captaciones y los sistemas de tratamiento, la repartición de caudales normalmente se realiza con vertederos

en unidades llamada tanquilla de distribución, cuyo tamaño depende del caudal y del número de unidades requeridas. Se debe construir con la cresta horizontal y las dimensiones iguales para garantizar el nivel y la división uniforme de la cantidad de agua. Las condiciones son difíciles de cumplir al construirse para caudales menores a 100 ml/s, por el tamaño requerido.

En el caso del FiME en la hacienda Majavita, según [2] la variación del caudal para un periodo de monitoreo de un año con 15 mediciones se estableció en promedio de 31.1, desviación estándar de 3.0, un mínimo de 26.6 y máximo de 36.5 en ml/s, dando como resultado un coeficiente de variación de 10, de modo que es un valor homogéneo; sin embargo, se da un rango de variación de 10 ml/s correspondiente al 30% del valor medio.

Para la dispersión de caudales se utilizan normalmente flautas construidas en tuberías con orificios, para la correcta distribución se debe garantizar estar niveladas. Con el tiempo, los orificios se obstruyen y fácilmente se pierde el nivel horizontal sin garantizar la correcta dispersión del agua afectando el comportamiento hidráulico de la unidad donde se esté utilizando.

En los antecedentes, se relacionan variables como caudal y presión para algunos diámetros de tubería para condiciones de laboratorio o tuberías de presión donde aplican el principio de Torricelli. Sin embargo, para las condiciones requeridas de diseño, en este caso no son aplicables.

## 1.2 Antecedentes

Los orificios tienen diferentes tipos de aplicaciones como la distribución y medición del caudal, también la disipación de energía como el caso reportado por [3] en que se utilizan para el diseño y la construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada de un canal experimental usando valores para el coeficiente de descarga de 0.62 para poder suministrar el caudal requerido.

Realizando pruebas de laboratorio para determinar caudal con diferentes métodos de medición, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos utilizando un tubo Venturi con el cual se establecen caudales en función de las diferencias de presiones en ciertos puntos del tramo, una tobera y por último una placa orificio. Con estos tres [4] instrumentos, se establecieron los caudales utilizando la ecuación de Bernoulli para hallar la velocidad de flujo y multiplicándola por el área del tubo. Como resultado, se estableció la placa de orificio como el medidor de flujo con mayor producción de pérdidas de presión llegando a ser la presión interna de la tubería muy similar a la presión ambiente [5].

Mediante un análisis del flujo de algunos fluidos a través de un sensor de placa de orificio buscaron mejorar la exactitud de este, encontrando factores de corrección y con estos propusieron algunos cambios en el diseño de la placa, además realizaron simulaciones numéricas usando el software FLUENT. Luego de haber realizado este procedimiento, se

llevaron a cabo pruebas experimentales en las cuales se evaluaron dos placas de orificio: una diseñada de acuerdo con los estándares de la norma ISO 5167-2 (2003) y la otra no cumplía dichos estándares. De esta forma, establecieron algunas condiciones geométricas que mejoraron la exactitud en la medición de flujo, además encontraron que produciendo una caída de presión con placas de orificio de espesores mayores a los recomendados por la norma ISO 5167-2 se obtiene mayor precisión en las mediciones [6].

De otra forma, realizando el diseño y la construcción de un medidor de flujo de placa de orificio con aditamentos de sensores de presión de fibra óptica, este equipo presentaba una disminución de la sección de flujo, generando un incremento de su velocidad, lo cual producía a su vez la disminución de la presión de modo equivalente al incremento de velocidad. Se realizaron mediciones en la entrada y salida del medidor generando una calibración de este sistema mediante el uso de manómetros de Bourdon en un intervalo de 0 a 20 psi, obteniendo dos medidores construidos con sensibilidades de 0.29V/psi y 0.28 V/psi con precisiones del 10.4 y del 5.8%, respectivamente [7].

En otro proyecto, diseñaron y pusieron a prueba un prototipo de tubo de Venturi para realizar las mediciones de caudales utilizados en un laboratorio, agregando un frasco de Mariotte desde donde se suministraba el agua al ingreso tubo de Venturi, permitiendo tener un flujo de tipo laminar, lo cual facilitaba la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

Para establecer el caudal dentro del tubo, se aplica el principio de Bernoulli en función de la diferencia de presiones registrada por dos manómetros para determinar la velocidad del flujo y al multiplicarla por el área del tubo obtener el caudal, obteniendo resultados de caudales similares o los aforados volumétricamente y un coeficiente de descarga para este prototipo de 0.962 evidenciando una cantidad mínima de pérdidas de energía [8].

Por otra parte, realizando pruebas de medidores tipo placa de orificio con diámetro de 4" y relación beta de 0.5, el cual cumplía las especificaciones de la norma ISO 5167 parte 2, buscando demostrar el sistema de diagnóstico desarrollado por DP Diagnostics llamado Prognosis para este tipo de medidores. Dicho sistema de diagnóstico utiliza las metodologías de ecuación de flujo tradicional, ecuación de flujo por expansión y ecuación de flujo PPL, y después compara los resultados obtenidos entre estas, encontrando que el sistema evaluado es el primero y más integral para valorar en línea los medidores de flujo bajo el principio de presión diferencial, dentro de los cuales se encuentran los medidores tipo placa de orificio [9].

Además, mediante el estudio de los diferentes métodos de medición de corrientes utilizados en Colombia, dándoles una aplicación de regadío para el sector agrícola, encontrando diferentes métodos dependiendo del tipo de flujo (conductos abiertos y tuberías) en los cuales el método de orificios es utilizado para la medición en condiciones de flujo

libre, los cuales son utilizados además de una opción de aforador como forma de regular y distribuir el agua hacia los diferentes terrenos. Como método de medición en flujo libre, se utiliza la ecuación de Torricelli para determinar la velocidad de descarga y al multiplicarse por el área del orificio se establece el caudal concluyendo en su estudio como factores determinantes para establecer un método de aforo adecuado el grado de dificultad de la corriente, justificación económica, exactitud de la medición y el objeto de estudio [10].

Dentro del estudio en el cual se construyó un prototipo de aforador de caudal digital, con requisitos mínimos de mantenimiento para evitar incremento en costos, desarrollando un equipo que permite el aforo de caudales en tuberías de presión de 4" con aplicación para aguas residuales y agua potable, utilizando materiales resistentes a la exposición al medio ambiente y los contaminantes disueltos en las aguas residuales, este equipo permite su calibración la cual se hizo mediante una ecuación determinante del gasto de agua en un determinado tiempo, el cual es registrado en la consola del transductor, generando un resultado con confiabilidad total [11].

Otro uso es en el modelamiento de fugas en tuberías de presión como el realizado [4] donde se intentaba determinar los parámetros y las ecuaciones para explicar, con una confiabilidad adecuada, el comportamiento hidráulico de fallas longitudinales reales en tuberías de PVC con el fin de entender

las fugas en las redes como una función directa de la presión para poder ser calibradas obteniendo una relación entre caudal, presión, diámetro de la tubería y la longitud de la falla con coeficiente de correlación de 0.954.

Los equipos de orificios son usados en laboratorios como material didáctico. Un ejemplo es el proyecto realizado por [12] donde se construyó un modelo de descarga de líquidos por orificios con la finalidad de tener un mejor conocimiento del proceso de descarga como operación unitaria, encontrando un coeficiente de descarga promedio de 0.65 para una orificio de 5 mm de diámetro para profundidades entre 12 y 45 cm y caudales de 32 a 56 ml/s.

En la Figura 1 se presenta el aforador de caudal de orificio circular construido en accesorios de PVC controlando el caudal con una válvula.



**Figura 1.** Aforador de caudal de orificio circular. Fuente: Elaboración propia.

La justificación de la investigación está basada en la necesidad de realización de proyectos de investigación a pequeña escala para medir y distribuir caudales reducidos. Por ello, se establece un modelo para la determinación del diámetro y profundidad requeridos a partir de datos experimentales.

El objetivo general fue determinar la precisión en la medición y descarga de caudal mediante un orificio circular como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de agua. Los objetivos específicos fueron: estimar la precisión de la ecuación teórica y el coeficiente de descarga para estimar el caudal de salida por el orificio. Identificar el comportamiento de la velocidad y el caudal a la salida por un orificio respecto del diámetro y la profundidad. Y establecer las ecuaciones de regresión lineal múltiple para estimar los caudales de salida a través del orificio.

## 2. Metodología

### 2.1 Tipo de investigación

La clasificación del tipo de investigación se hace según [13] de modo que es de carácter cuantitativo al realizar recopilación de datos mediante la medición de profundidades y caudales en cada diámetro de orificio. Se utilizó estadística para describir el comportamiento de las variables y establecer patrones de comportamiento. Los resultados obtenidos fueron generalizados y pueden ser utilizados para el diseño de unidades de distribución y control de caudal en condiciones similares.

El alcance de la investigación fue correlacional al buscar la relación y establecer un patrón de predicción, es decir, un valor aproximado para el grupo de diámetros utilizados. Por ello, se hallaron los coeficientes de correlación entre las variables caudal, diámetro y profundidad, buscando el mejor modelo para cada caso, calculando velocidades y coeficientes de descarga describiendo el comportamiento en cada situación.

El diseño es experimental al controlar los diámetros de los orificios y la carga hidráulica para cada uno de los casos, midiendo el caudal de salida mediante aforos volumétricos evidenciando la variación respecto de las variables estímulo.

### 2.2 Definición de variables

Las variables establecidas a partir de los objetivos son las descritas en la tabla 1. Mediante estas se determinó el patrón de comportamiento y su correlación.

**Tabla 1.** Variables y su clasificación

Tipo	Variable	Unidad
Dependiente (respuesta)	Caudal	ml/s
	Velocidad	m/s
	Coeficiente de descarga	—
Independiente (estímulo)	Diámetro del orificio	mm
	Carga hidráulica	cm
Parámetro	Espesor de la pared	mm

Fuente: Elaboración propia.

Las variables independientes diámetro del orificio y carga hidráulica o profundidad fueron modificadas para establecer la respuesta en el caudal y el coeficiente de descarga y así describir su comportamiento.

### 2.3 Técnicas de investigación

La técnica utilizada para la recopilación de la información en la investigación fue la realización de pruebas controladas en el laboratorio de hidráulica con el suministro de agua del sistema de bombeo manteniendo el nivel constante, midiendo caudales y carga hidráulica para calcular velocidades y coeficientes de descarga.

### 2.4 Análisis estadístico

En la ejecución de la investigación la técnica estadística utilizada fue cuantitativa de tipo muestreo para determinar la correlación entre las variables calculando coeficiente de correlación, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los errores entre los datos medidos y calculados con las ecuaciones.

La estimación de las ecuaciones de regresión lineal múltiple se hizo mediante una hoja de cálculo en Excel basada en los procedimientos de [14] elaborada por el autor principal.

Se realizaron diagramas ANOVA con la aplicación libre MegaStat para identificar la variación de los resultados.

También se utilizó el programa InfoStat versión estudiantil para hacer los diagramas Dotplot y BoxPlot.

Se estimaron ecuaciones y los valores de error estándar con la versión libre del programa Curve Expert 1.4 para correlacionar el coeficiente de descarga con el número de Reynolds.

### 2.5 Materiales

Los orificios utilizados son de sección circular. De tamaño pequeño por tener una relación  $d < (1/3H)$ . De pared delgada según la relación entre el espesor del tubo y el diámetro. El único contacto entre el líquido y la pared es alrededor de una arista afilada y  $e < (1.5D)$ . Según su funcionamiento con descarga libre de acuerdo con la clasificación realizada por [15].

Los experimentos se realizaron en dos condiciones: uno para establecer la relación del caudal a la salida de un tanque para el suministro de agua y otro para la distribución y medición de caudal.

En el primer caso, se usó un tanque con adaptadores macho y hembra localizados a diferentes profundidades desde un punto de rebose donde se instalaban las placas de acrílico con orificios para cada uno de los diámetros seleccionados.

En el segundo tipo de condición, se utilizaron tubos de 42 mm de diámetro a los cuales se les hicieron orificios con los diámetros seleccionados y se colocaban conectados a un tanque de 20 l mediante una tubería y una válvula metálica para controlar el caudal y la carga hidráulica respecto del centro del orificio.

Las brocas utilizadas para la abertura de los orificios fueron para perforaciones en metales.

## 2.6 Equipos de medición

La medición de caudal se realizó mediante aforo volumétrico utilizando una botella de vidrio con un volumen de 320 ml y un cronómetro marca QyQ con aproximación de dos centésimas de segundo. Las distancias fueron medidas con un flexómetro con aproximación de 1 ml.

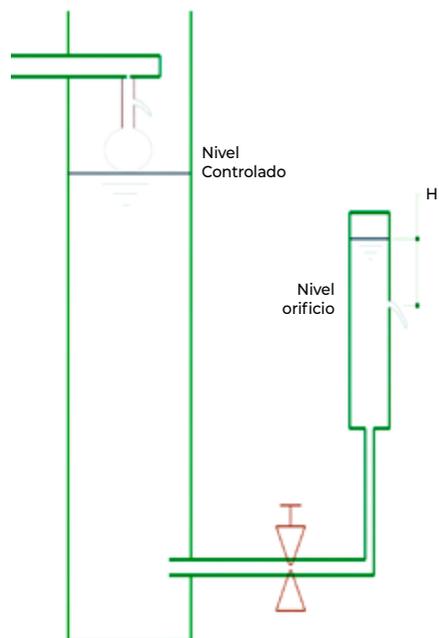
## 2.7 Procedimiento

Las pruebas consistían en la instalación de las placas con orificios en el tanque suministrando agua con el sistema de bombeo, controlando el caudal y el nivel máximo en el tanque, el exceso de agua era retirado por el rebose. Se medía el tiempo para llenar la botella. Luego se cambiaba el diámetro y la profundidad hasta completar el total de posibilidades.

En el segundo caso el procedimiento fue similar utilizando los tubos con los orificios, graduando el caudal, midiendo la carga hidráulica sobre el orificio y el tiempo para llenar la botella.

## 2.9 Población y muestra

En la estimación de los caudales a la salida del tanque se usaron cuatro diámetros: 3.2, 4.0, 6.0 y 7.9 ml y cinco profundidades: 11, 28, 43, 58 y 77 cm medidos desde la superficie hasta el centro del orificio. Para cada caudal se tomaban siete tiempos descartando el mayor y el menor dejando cinco. Obteniendo en total de 20 datos con rangos de caudal de 9 a 132 ml/s.



**Figura 2.** Unidad de medición y control de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

En la medición del caudal se utilizaron cinco diámetros: 3.2, 5.2, 6.4, 7.9 y 9.5 ml y cinco cargas hidráulicas: 2, 4, 6, 8 y 10 cm. Los caudales de la misma forma del caso anterior para un total de 20 datos con intervalo de caudal entre 3.5 a 55 ml/s.

En la Figura 2 se tiene una representación del dispositivo utilizado para realizar las pruebas en el laboratorio.

## 3. Resultados

Una vez realizadas las pruebas en el laboratorio y procesar los datos recopilados se presentan los principales resultados de modo que es una herramienta para diseño de dispositivos en los casos en que se requiera medición o descarga de un caudal a pequeña escala.

### 3.1 Estimación del caudal mediante orificio con ecuación y coeficiente de descarga teórico

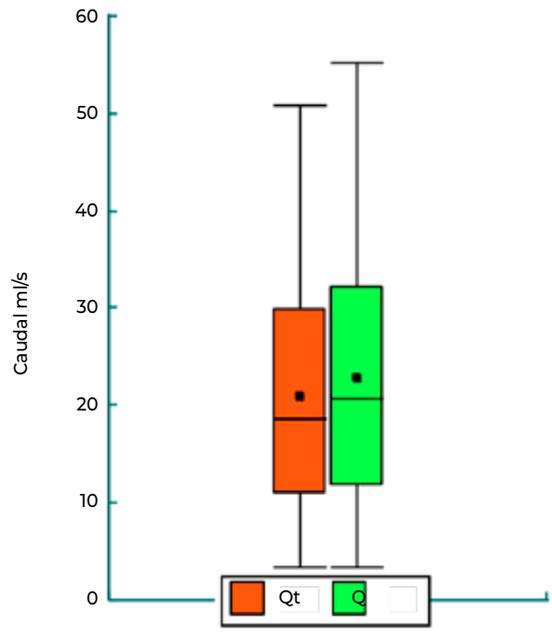
La estimación de la precisión de la ecuación teórica se realizó a partir del diámetro de cada orificio y de la profundidad respecto de la superficie del agua. Los valores del coeficiente de descarga se obtuvieron según ecuación (1) dependiendo del número de Reynolds ( $Re$ ) para cada caso para una viscosidad del agua a una temperatura de 21 °C.

Con los datos de la referencia se generó la ecuación (2) en Curve Expert 1.4 para estimar los coeficientes teóricos, con un error estándar de 0.00116 y  $R = 0.9965$ , y una precisión del 99.90% respecto de los datos a partir del número de Reynolds en el intervalo de 1,000 a 10,000.

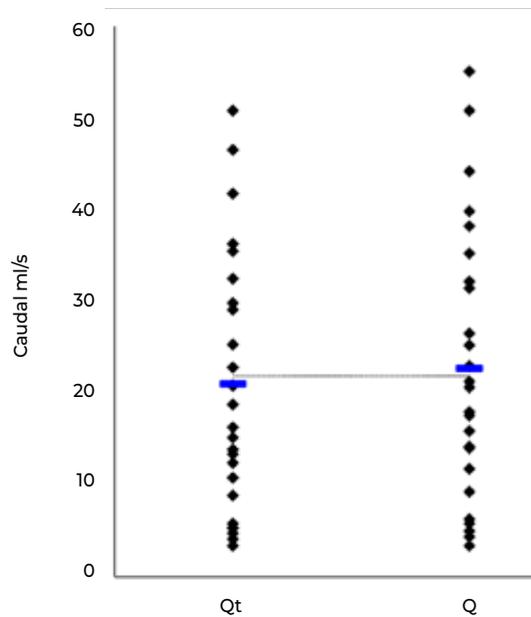
$$C_{at} = 0.9242(Re + 1738)^{0.03743} \quad (2).$$

Utilizando la ecuación (2) se calcularon los coeficientes de descarga teóricos y luego con la ecuación (1) los caudales teóricos para compararlos con los medidos, obteniendo la Figura 3 en que se aprecia la variación de los resultados entre caudales teóricos y medidos al observar promedios, medias y los intervalos obtenidos.

El rango de los caudales teóricos es menor en especial para los caudales más elevados, como se aprecia también en la Figura 4 al realizar el análisis de varianza dando un p-value de 0.6665, sin darse diferencia significativa entre los dos caudales.



**Figura 3.** Caudales teóricos ( $Q_t$ ) y medido ( $Q$ ).  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Análisis de varianza entre caudal teórico y medido.  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.** Intervalos de uso de las variables

Variable/unidad	Mínimo	Medio	Máximo	
Q	ml/s	3.4	22.8	55.1
H	cm	2.0		6.0
D	mm	3.2		9.5
Cd	—	0.68	0.72	0.76

Fuente: Elaboración propia.

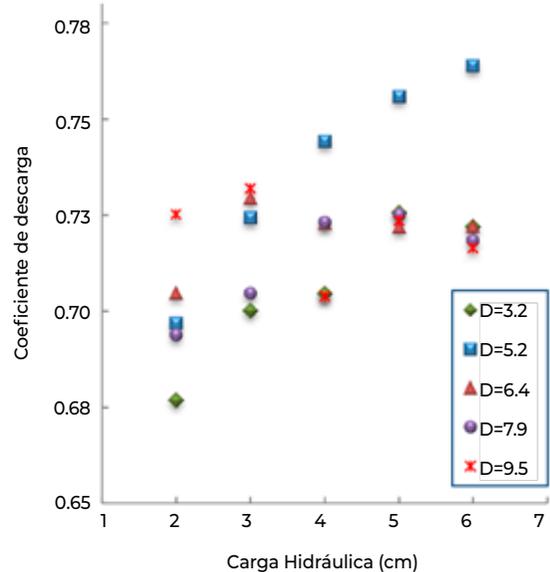
En las dos figuras se aprecia un valor promedio mayor para los caudales medidos, de modo que el valor similar es para los de menor valor incrementándose en los superiores notándose la diferencia. En promedio se obtiene un error del 7.2% con una desviación estándar de 2.9 en la estimación del caudal.

En la Tabla 2 se enseñan los intervalos de las variables utilizadas en los cálculos y algunos resultados como los coeficientes de descarga experimentales.

Los datos de la tabla permiten identificar los rangos en los cuales se hicieron las pruebas y son confiables los resultados.

### 3.2 Medición de caudal mediante orificio calculada con ecuación teórica y coeficiente de descarga experimental

A partir de la ecuación (1) se despeja el coeficiente y se calcula con los datos medidos en las pruebas obteniendo un valor promedio de 0.72 con una desviación estándar de 0.02 y un coeficiente de variación del 3%, de modo que son valores homogéneos, con un intervalo de confianza entre 0.712 y 0.727 al 95%. Sin embargo, al utilizar el coeficiente



**Figura 5.** Coeficiente de descarga respecto de la profundidad y el diámetro del orificio aforador.

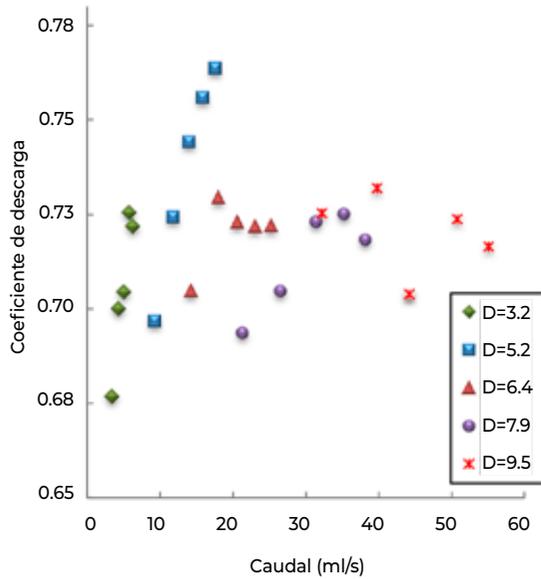
Fuente: Elaboración propia.

hallado, los valores de caudal difieren de los medidos.

La variación del coeficiente de descarga respecto de la profundidad y el diámetro del orificio se muestran en la Figura 5, de modo que son directamente proporcionales sin ser una tendencia generalizada para todos los diámetros, como el caso de 6.4 mm en que la variación es mínima y la mayor es para el diámetro de 5.2 mm.

Los menores valores del coeficiente se presentan en los mayores diámetros en este caso para 8.0 y 10 mm. En general se presenta una ligera variación respecto de las dos variables.

En la Figura 6 se presenta la relación entre el coeficiente de descarga experimental respecto del caudal y los diámetros, apreciando una distribución



**Figura 6.** Coeficiente de descarga experimental respecto del caudal y el diámetro del orificio  
Fuente: Elaboración propia.

diferente de la Figura 5. En este caso la distribución de los datos es mayor, agrupándose los valores para cada diámetro hacia un determinado lugar por el rango de caudal obtenido.

Por los anteriores resultados se establece una ecuación mediante una regresión lineal múltiple con una hoja de cálculo en Excel, dando como resultado la ecuación (3), la cual permite estimar el coeficiente en función del diámetro del orificio y la carga hidráulica o profundidad.

$$C_{de} = 0.7D^{-0.004}H^{0.024} \quad (3).$$

La ecuación tiene un coeficiente de correlación de 0.9998 y un error respecto de los valores del 1.64%, una desviación estándar de 1.02 para un coeficiente de variación del 62% de modo que es heterogéneo a pesar de la alta correlación. El

**Tabla 3.** Coeficientes de descarga por diámetro

Diámetro		Coeficiente descarga			ErQ
mm	in	P	DE	CV	%
3.2	1/8	0.72	0.020	3%	2.0
5.2	13/64	0.75	0.027	4%	2.9
6.4	1/4	0.73	0.009	1%	0.9
7.9	5/16	0.71	0.013	2%	1.6
9.5	3/8	0.72	0.011	1%	1.1

Fuente: Elaboración propia.

valor mínimo (0.004) del exponente del diámetro indica una baja influencia en el coeficiente de descarga.

En la Tabla 3 se encuentran los diámetros utilizados con sus respectivos coeficientes de descarga para la ecuación teórica y los resultados estadísticos.

Entre los valores del coeficiente y el diámetro no se da una tendencia. Los coeficientes de variación se encuentran en el rango homogéneo y los errores respecto de los caudales medidos son menores del 3% de modo que son aceptables.

El error obtenido al comparar los resultados de la ecuación y el coeficiente teóricos respecto de los caudales medidos se presenta en la Tabla 3, de modo que son mayores del 5% en los dos casos, al usar valores teóricos y al establecer el coeficiente experimental y usarlo en la ecuación teórica.

Los coeficientes de variación son superiores al 26%, por tanto, los datos son heterogéneos, así mismo el intervalo entre valores mínimo y máximo es superior al 12%, por ende, se obtiene una

**Tabla 4.** Porcentajes de error de la ecuación teórica

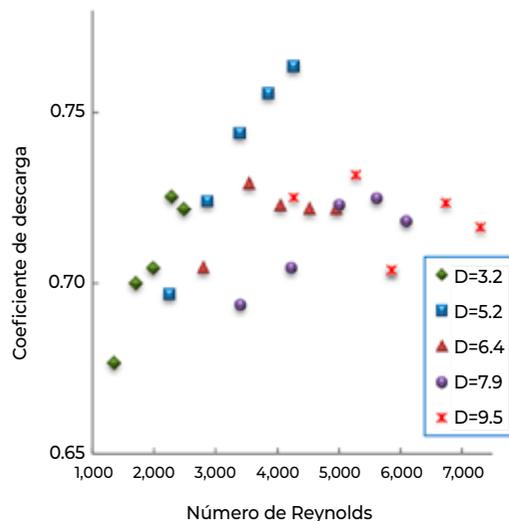
Errores	Teórico	Experimental
Promedio	7.2	6.9
Desviación estándar	2.9	2.8
Coefficiente variación	41	40
Mínimo	0.9	1.1
Máximo	12.8	12.6

Fuente: Elaboración propia.

dispersión de los valores para las dos situaciones.

En general se presenta una variación entre los coeficientes de descarga teóricos y experimentales del 7.8% con una desviación estándar del 3.4 con un rango del 11.4% al comparar los valores.

El comportamiento del coeficiente de descarga respecto del número de Reynolds para cada uno de los diámetros, apreciando una variación considerable



**Figura 7.** Coeficiente de descarga experimental respecto del número de Reynolds.

Fuente: Elaboración propia.

sin tener tendencia definida como se puede ver en la Figura 7.

En el caso de los dos diámetros menores se presenta un incremento en el coeficiente de descarga, para los otros tres diámetros el valor fluctúa en un intervalo menor. Los valores más elevados del número Reynolds corresponden a los diámetros mayores.

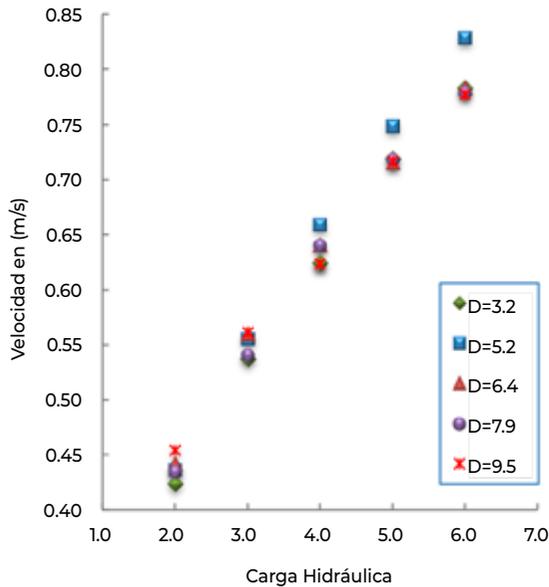
### 3.3 Variación del caudal y la velocidad por orificio

De acuerdo con la ecuación teórica el caudal efluente por el orificio se incrementa respecto del caudal y el tamaño de forma directa y la velocidad depende únicamente de la profundidad desde la superficie hasta el orificio.

En la Figura 8 se observa la variación de la velocidad de salida respecto de la profundidad para los diámetros en milímetros evaluados.

Se aprecia el incremento de la velocidad con la profundidad del orificio con algunas variaciones respecto de los diámetros en especial para el de 5 mm en el cual se presentan las mayores siendo 0.84 m/s y el de 8 mm correspondiendo las menores con 0.43 m/s.

La ecuación (4) es el resultado de la correlación entre la velocidad en m/s y la profundidad en cm dando un coeficiente de correlación de 0.9925, en que el exponente tiene un valor aproximado al teórico de 0.5 por las variaciones en la medida de caudales y profundidades. También puede presentarse alguna irregularidad en el orificio de 5 mm en el



**Figura 8.** Velocidad en el orificio aforador respecto de la profundidad y el diámetro del orificio.

Fuente: Elaboración propia.

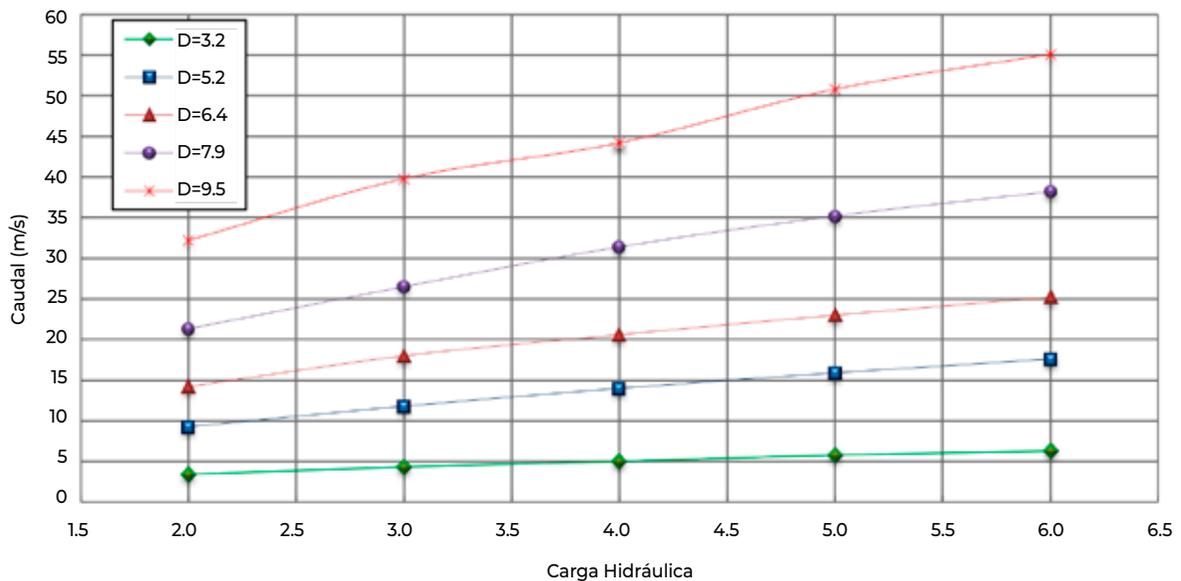
que se presenta la mayor dispersión de los datos.

$$V = 0.3049H^{0.5377} \quad (4)$$

En la Figura 9 se representa la variación del caudal en función de la profundidad y el diámetro de los orificios con un comportamiento uniforme de la variable dependiente caudal respecto de las dos independientes como lo expresa la ecuación teórica (1).

Las correlaciones entre caudal y profundidad se encuentran entre 0.9936 para el diámetro de 6.4 mm y 0.9968 para el de 5.2 mm con caudales comprendidos entre 3.4 y 55.1 ml/s con un rango de 51.7 ml/s para los diámetros utilizados.

La ecuación (5) es el resultado de la regresión lineal múltiple a partir de los datos de caudal, carga hidráulica y los cinco diámetros, obteniendo una correlación de 1.00.



**Figura 9.** Variación del caudal respecto de la profundidad y el diámetro en el orificio aforador

Fuente: Elaboración propia.

$$Q_r = 0.3342D^{1.8161} H^{0.5377} \quad (5).$$

La ecuación permite calcular el caudal de salida en ml/s en función del diámetro del orificio en mm y la carga hidráulica en cm.

Los valores de error de la ecuación respecto de los caudales medidos se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5.** Precisión de la ecuación de regresión

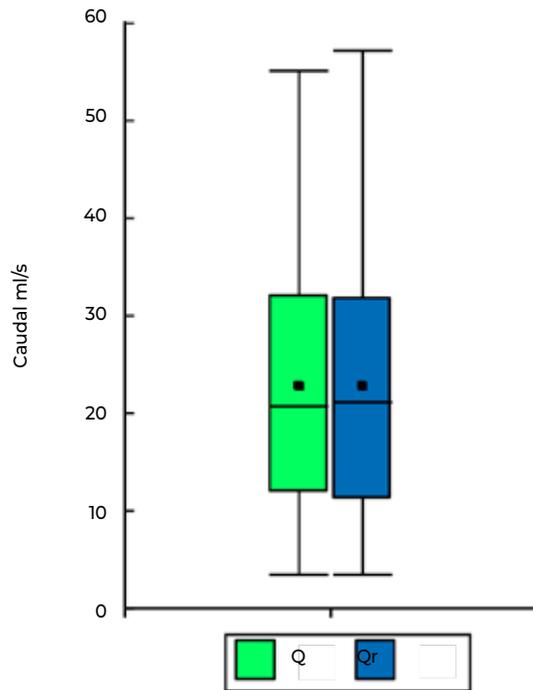
Parámetro	(%)
Promedio	97.1
Desviación estándar	2.1
Coefficiente de variación	71
Mediana	97.6
Mínima	92.5
Máxima	99.9

Fuente: Elaboración propia.

La precisión es mayor al 95% de modo que es aceptable y la menor se presenta en el diámetro de 5.2 mm dando un rango del 7.4% entre los valores obtenidos. El error de la ecuación está en el intervalo de confianza de 2.0 a 3.7 con un confiabilidad del 95%.

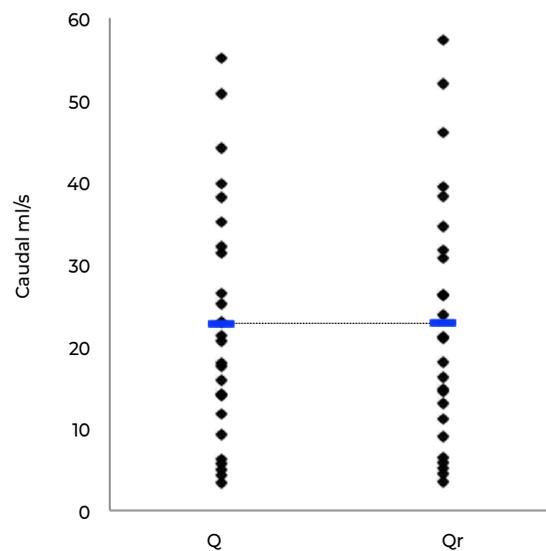
La Figura 10 presenta la comparación entre caudales medidos y calculados con la ecuación de regresión lineal múltiple hallada.

Las variaciones en los datos de mediana y promedio para los dos grupos de datos son mínimas, como se puede observar en la figura, se presenta un leve incremento en los caudales superiores calculados con la ecuación de regresión. Para definir si existe diferencia entre los



**Figura 10.** Caudales medidos (Q) y de regresión (Qr).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11.** Comparación entre caudales medido (Q) y de regresión (Qr).

Fuente: Elaboración propia

valores se realiza el análisis de varianza presentado en la Figura 11.

se puede observar la similitud entre los caudales y las medias de los dos datos; sin embargo, el p-value tiene un valor de 0.9826 sin presentar diferencia significativa entre los dos grupos a pesar de la variación de los datos del diámetro de 5.2 mm en que se presentan las mayores diferencias.

### 3.4 Coeficiente de descarga experimental para orificio de salida libre

En esta segunda parte se presentan los resultados de los orificios de salida libre utilizados para suministrar agua desde un recipiente o tanque mediante una perforación en un disco de acrílico instalado en un adaptador macho de tubería PVC.

En la Tabla 6 se aprecian los intervalos de uso de las variables y las unidades de medida.

En este caso los rangos de caudal y profundidad son mayores para permitir usarlos en tanques con volúmenes de 1000 l con alturas de 1 m.

**Tabla 6.** Intervalos de uso de las variables

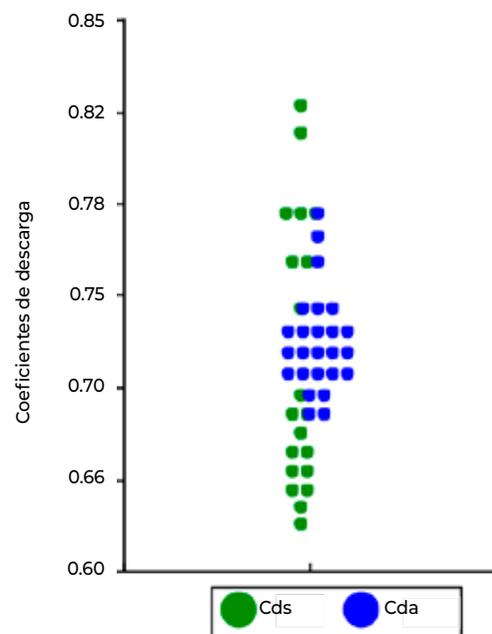
Variable/unidad	Mínimo	Medio	Máximo	
Q	ml/s	9.1	47.4	131.5
H	cm	10.7	43.4	76.7
D	mm	3.2	5.2	7.9
Cd	—	0.63	0.71	0.82

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se encuentra la distribución de los coeficientes de descarga experimentales (Cds) calculados a partir de la ecuación teórica con los valores medidos de caudal y profundidad. Se aprecian dos agrupaciones de valores: una entre 0.63 a 0.70 y la otra entre 0.74 y 0.82, de modo que es mayor la cantidad de valores en el primer grupo sin tener valores próximos al promedio.

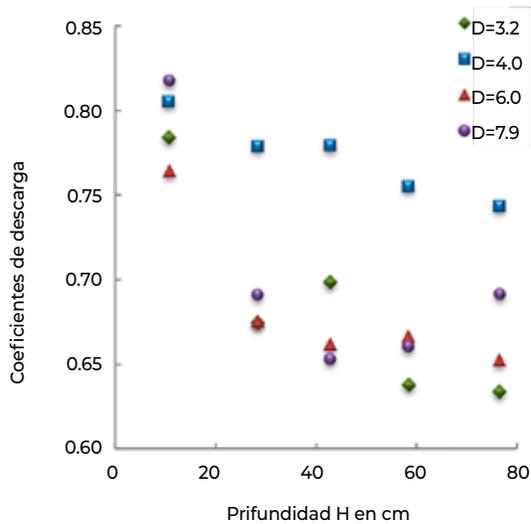
Los coeficientes de los orificios aforadores (Cda) se encuentran en su mayoría agrupados en un intervalo pequeño y alrededor del promedio, debido al rango de profundidades entre 2 y 6 cm utilizadas para el cálculo de los caudales de aforo.

El comportamiento de los coeficientes se complementa con la Figura 13 en



**Figura 12.** Distribución de coeficientes de descarga.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 13.** Distribución coeficientes de descarga. Fuente: Elaboración propia.

que se pueden identificar el diámetro 4.0 mm con los mayores valores junto con los correspondientes a las profundidades de 10 cm mostrando una variación respecto de las demás profundidades utilizadas.

En la Tabla 7 se presentan los coeficientes de descarga promedio (P) para los diámetros utilizados junto con los resultados estadísticos.

**Tabla 7.** Coeficientes de descarga por diámetro

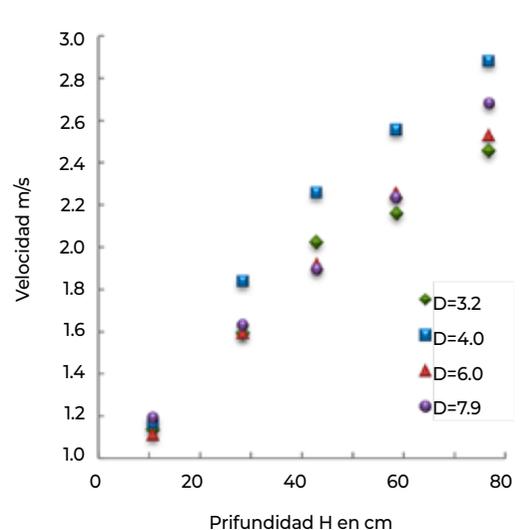
Diámetro		Coeficiente de descarga			ErQ
mm	in	P	Sd	CV	%
3.2	1/8	0.69	0.061	9%	6.4
4.0	5/32	0.77	0.024	3%	2.4
6.0	15/64	0.68	0.046	7%	4.5
7.9	5/16	0.70	0.067	9%	6.3
Promedio		0.71	0.049	7%	4.9

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos tienen un comportamiento heterogéneo, se dan variaciones al cambiar de diámetro, los coeficientes de variación (CV) se clasifican como homogéneos. Para dos diámetros los errores respecto de los caudales medidos son mayores al 5%, por ello se debe buscar otra forma de relacionar las variables estudiadas.

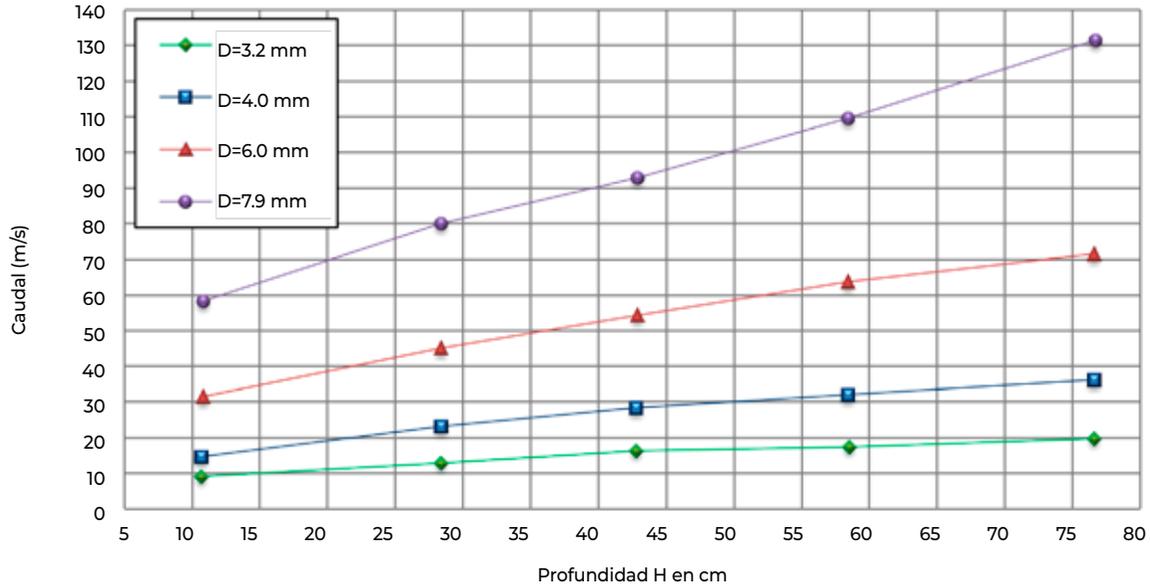
### 3.5 Variación del caudal y la velocidad por un orificio de descarga libre

En la Figura 16 se aprecia la variación de la velocidad función de las profundidades y los diámetros, con intervalo entre 1.1 y 2.9 m/s de modo que son muy superiores a las de los orificios aforadores por el incremento de la profundidad y por tanto de la presión interna saliendo el agua con mayor velocidad.



**Figura 14.** Comportamiento de velocidad de salida.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 15.** Caudal de salida por el orificio de descarga libre

Las mayores velocidades se dan en el diámetro de 4.0 mm para todas las profundidades excepto la menor. Los otros tres diámetros tienen comportamientos similares, sin una tendencia única, con mayor dispersión al aumentar la profundidad.

El comportamiento del caudal de salida por el orificio se muestra en la Figura 15 siendo muy clara la tendencia y la correlación entre las variables y el incremento por los diámetros para una misma profundidad.

El caudal de descarga casi se duplica del diámetro de 6.0 mm al de 7.9 con un aumento de 1.9 mm. Por tanto, al requerirse más caudal de salida, se deben hacer pequeños incrementos en el diámetro del orificio. La mayor correlación 0.9989 se presenta en el diámetro de 7.9 mm y la menor 0.9808 para 3.2 mm, de modo que es inversa la relación.

En la ecuación (6) se relacionan las tres variables caudales de descarga, diámetros de los orificios y las profundidades para los valores medidos. Los exponentes varían un poco respecto de la ecuación obtenida para el orificio aforador en especial el de la profundidad con un valor inferior a 0.5, de modo que es más notoria la influencia del diámetro en el caudal.

$$Qr = 0.4338D^{1.8428} H^{0.4192} \quad (6)$$

Los resultados estadísticos de comparación entre los caudales medidos y los calculados se presentan en la tabla 8, modo que son propicios para ser utilizados en diseños por tener una precisión mayor del 95% y una correlación de 1.0 entre los datos.

Los resultados son similares a la ecuación para orificios aforadores donde la precisión fue mayor. En este caso

**Tabla 8.** Precisión de la ecuación de regresión

Parámetro	(%)
Promedio	96.4
Desviación estándar	1.8
Coefficiente de variación	52
Mediana	96.5
Mínima	93.0
Máxima	99.5

el coeficiente de variación fue inferior por tener una menor dispersión de los errores en cada caudal.

### 3.6 Medidor de caudal mediante orificio circular en un UASB y un FGD*i*

Con los resultados obtenidos se han diseñado aplicaciones del medidor de orificio. En la Figura 16 se observa un ejemplo del aforador instalado para controlar el caudal de ingreso a un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB, por su sigla en inglés), para el tratamiento de las aguas residuales del café en la hacienda Majavita.

El medidor fue diseñado para suministrar un caudal de 5 ml/s utilizando un orificio de 3.2 mm y una carga hidráulica de 4.0 cm. El medidor fue construido con accesorios de tubería sanitaria, una tee de 42 mm (1½") donde se instalan el piezómetro usando una jeringa de 10 ml insertada en un codo para agua caliente. En la tee también se coloca el disco perforado, luego va un codo donde se perfora una abertura para verificar el flujo. Por la parte superior se puede



**Figura 16.** Medidor de caudal de orificio circular en un UASB

ingresar un elemento para limpiar residuos acumulados. Adicional se requieren dos bujes: uno al ingreso y otro a la salida para conectar a la tubería del sistema. El caudal es controlado por una válvula antes del medidor. Otra válvula en la parte inferior permite retirar los sedimentos acumulados. Para regular el caudal se instala un flotador en el tanque de suministro garantizando una carga constante.

En la Figura 1 se muestra un medidor de caudal instalado en un filtro grueso dinámico (FGDi) del sistema de filtración en múltiples etapas (FiME). En este caso se construyó utilizando accesorios PVC para un caudal de 30 ml/s con un diámetro de 7.9 mm y una carga de 4.0 cm. Con el equipo es posible definir el caudal a la salida del filtro de una forma sencilla.

## 4. Discusión

En la ecuación teórica presentada en (1) para el cálculo del caudal de salida en un orificio de pared delgada el exponente del diámetro es 2.0, para la ecuación hallada del orificio aforador es de 1.8161 con una variación del 9.2% y para el caso del exponente de la carga hidráulica el valor teórico es de 0.5 y el establecido es de 0.5377 con una variación del 7.5%, de modo que son algo diferentes por ser para unas condiciones específicas.

En el caso de la ecuación de descarga el exponente del diámetro es similar al anterior; sin embargo, para el caso de la profundidad cambia respecto del teórico y de la primera ecuación con un valor de 0.4192 y una variación del 16%, de modo que es una diferencia considerable.

En la figura utilizada en (1) para calcular el coeficiente de descarga en función del número de Reynolds se presenta una tendencia definida de los datos; sin embargo al calcularlos para el orificio aforador se genera una dispersión de los datos.

En el modelamiento realizado por (12), encontró un coeficiente de descarga promedio de 0.65 para una orificio de 5 mm de diámetro. Los resultados encontrados en este caso son mayores de 0.70, la diferencia puede ser explicada por las características de los orificios. En el antecedente se utiliza un tubo y una válvula de control, incrementado la energía requerida para el flujo, dando como resultado un menor coeficiente.

En el dispositivo de disipación realizado por [3] utilizan un coeficiente de

0.62 para el diseño y posterior construcción debido al espesor de las paredes del equipo. Por ello la diferencia con los resultados presentados en este caso al tener paredes de 2 mm.

En el modelamiento de fugas en tuberías de presión como el realizado por [4] se obtiene una ecuación para cuatro variables con un coeficiente de correlación de 0.954. En este caso se logran mayores del 0.985 únicamente con tres variables.

## 5. Conclusiones

En la estimación del caudal mediante un orificio con la ecuación teórica utilizando coeficientes de descarga teóricos y experimentales los errores obtenidos en promedio son superiores al 5%; sin embargo, al utilizar los valores experimentales hallados para cada diámetro, los resultados son mejores usando únicamente los aquí estudiados.

El coeficiente de descarga presenta una mayor relación con la profundidad y el diámetro de los orificios, obteniendo una tendencia definida; contrario a los otros casos evaluados, como velocidad, caudal y número de Reynolds en que se dispersan.

El comportamiento de la velocidad media de flujo a la salida de los orificios es proporcional a la profundidad por depender de la presión en el punto dentro del fluido. Se dispersan los valores para algunos diámetros con el incremento de la profundidad.

La relación entre caudal, carga hidráulica y diámetro tiene la mayor correlación

entre las variables analizadas. Por ello se generaron las ecuaciones de regresión lineal múltiple útiles en el diseño de orificios para medir y descargar caudal de forma controlada y precisa.

Las principales variaciones en los resultados para la medición de caudal se dan por los datos del orificio de 5.2 mm, posiblemente por alguna falla en la toma de datos o en la geometría del orificio.

Según las ecuaciones obtenidas para predecir el comportamiento del caudal respecto de la carga hidráulica y el diámetro del orificio es posible medir el flujo con una precisión superior al 95% para caudales inferiores a 135 ml/s controlando el nivel del agua a circular por el orificio en el aforador o de descarga desde un tanque.

Las ecuaciones y los coeficientes de descarga obtenidas son una herramienta de diseño en casos en que se requiera estimar el diámetro y la profundidad para obtener un caudal especificado.

Realizar nuevas pruebas para los diámetros de 5.2 mm en el caso del orificio aforador y para el de 4.0 mm en el de descarga en los cuales se presentaron las mayores variaciones en los resultados.

Con este tipo de equipo de medición mediante orificio, se facilita el proceso de determinación de pequeños caudales generalmente usados para sistemas de tratamiento de aguas y en procedimientos de laboratorio.

Este dispositivo permite además su uso como distribuidor de caudal en el momento de requerirse dividir un flujo de entrada o salida de un sistema

a diferentes unidades del proceso de tratamiento.

El aforador y distribuidor de caudal permite también establecer las presiones dinámicas en un flujo sin la necesidad de utilizar manómetros.

Se requiere utilizar las ecuaciones en otros proyectos de investigación y sistemas piloto de potabilización y tratamiento de aguas residuales para comprobar la precisión y los resultados obtenidos.

## Referencias

- [1] Sótelo Ávila, G. (2007). *Hidráulica general, vol. 1*. México: Limusa.
- [2] Vega Serrano, H. A. (2013). *Evaluación del sistema de filtración en múltiples etapas FIME en tanques plásticos con presedimentación y retrolavado en La Hacienda Majavita (Socorro, Santander)*. Tesis de maestría. Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- [3] Rodríguez Cárdenas, H. S. & Camargo Guarín, S. A. (2013). *Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI*. Tesis de grado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- [4] Ávila Rangel, H. & González Barreto, C. (2006). Determinación de parámetros de fuga para fallas longitudinales, en conexiones domiciliarias y en uniones de tuberías en PVC. *Revista de Ingeniería*, 24, 15-22.

- [5] García, R. A., Norberto Flórez Solano, E. & Guerrero Gómez, G. (2017). Construcción de un banco de pruebas de medidores de flujo para el laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Francisco de Paula Santander. *Revista Ingenio UFPSO*, 14 (1), 19–26.
- [6] Almaraz-Gómez, A., Arellano-Collí, I. A., López-López, C., Plascencia, G., Barrón-Meza, M. A. & Jaramillo, D. (2009). Análisis de flujo en un sensor de placa de orificio. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24 (3), 107–120.
- [7] Aguilar Chávez, A. (2008). *Medidor de flujo de placa de orificio con sensores de presión de fibra óptica*. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- [8] Pazmiño-Mayorga, J. A., Vivas-Vivas, R. J., Tafur-Recalde, V. L. & Ordóñez-Pizarro, W. I. (2017). Determinación del coeficiente de descarga de un prototipo tubo de Venturi construido para uso académico en laboratorio. *Polo del Conocimiento*, 2 (6), 1081–1102.
- [9] Moncada, D., Juárez, I., Gutiérrez, C. & Casillas, J. J. (2013). Resultados de pruebas de un sistema de diagnóstico de medición por placa de orificio en laboratorio de flujo de CIATEQ. En *Congreso Mexicano del Petróleo*, Colegio de Ingenieros Petroleros de México, Cancún, Quintana Roo.
- [10] Legarda Burbano, L. & Ruiz Eraso, M. H. (2000). Medición de corrientes de agua con fines de ingeniería de regadíos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 17 (1), 338–353.
- [11] Ferriño Fierro, A. L. (1998). *Medición de caudales en conductos circulares de presión utilizando un transductor digital*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- [12] Olalla Procel, C. G. (2012). *Diseño y construcción de un equipo semiautomático de descarga de líquidos por orificios para la determinación de la velocidad de salida*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- [13] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación*, 4<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill.
- [14] Chapra, S. C. & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*, 5<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill.
- [15] De Azevedo Netto, J. M. & Fernández y Fernández, M. (1998). *Manual de hidráulica*, São Paulo: Blucher.