



Medición del caudal mediante orificios circulares como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de aguas residuales



Avance Proyecto "Adaptación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques de polipropileno"

Haimar Ariel Vega Serrano¹, Luis Carlos Villamizar Garzón y Darwin Iván Arenas Plata²

¹Ingeniero civil. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental, Universidad Libre Seccional Socorro. inghaimar@gmail.com

²Ingenieros ambientales, auxiliares semillero SIXTRAK, Ingeniería Ambiental. luis01v@gmail.com, ing.darwing@gmail.com

Recepción artículo junio 26 de 2014. Aceptación artículo, agosto 18 de 2014

INNOVANDO EN LA U ISSN 2216 - 1236

RESUMEN

Problema: La medición y distribución de caudales inferiores a 100 ml/s se dificulta por las reducidas dimensiones implicadas para construir las unidades garantizando uniformidad, situación presente en sistemas piloto o proyectos de investigación donde se requiere la división del flujo en partes iguales y su correcto cálculo. En la Hacienda Majavita de la Universidad Libre Seccional Socorro se han construido sistemas de filtración (FiME) y de tratamiento de aguas residuales del café (STARCAFÉ), presentándose la situación descrita.

Figura 1. . Aforador de orificio circular sistema FiME Hacienda Majavita



Objetivo: Determinar la precisión en la medición y descarga de caudal mediante un orificio circular como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de agua. **Metodología:** Se realizaron pruebas con orificios circulares construidos en tuberías midiendo el caudal de forma volumétrica y cargas hidráulicas con piezómetros, descarga de caudales mediante orificio libre, para determinar ecuaciones de correlación de tipo potencial.

Resultado: La ecuación obtenida mediante regresión lineal múltiple para calcular el caudal de salida por el orificio tiene una correlación de uno 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. **Conclusión:** 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 mililitros por segundo controlando el nivel del agua comprobando la hipótesis planteada y aportando una solución factible al aforo de caudales a pequeña escala.

Palabras clave

Carga hidráulica, distribución y dispersión de caudal, coeficiente de descarga.

I. 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 donde se debe potabilizar para hacerla apta para el consumo humano o para tratar aguas residuales agroindustriales para disminuir el impacto negativo en las 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. En este caso donde se tiene la necesidad son el sistema de filtración en múltiples etapas FIME con caudales de operación entre 20 y 30 mililitros por segundo según *Rueda, Velazco y Vega (2012, p. 81)* y también el sistema de tratamiento de aguas residuales del café con caudales alrededor de seis mililitros por segundo en los reactores anaerobios del sistema de acuerdo a *Salazar Salas et al, (2013, p. 47)* y de 10 ml/s para el reactor UASB evaluado.

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 *Sotelo Ávila (1997, p. 204)* es:

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

Donde el 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.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La repartición de caudales normalmente se realiza con vertederos en unidades llamadas tanquilla de distribución cuyo tamaño dependen del caudal y del número de unidades requeridas, se debe construir con la cresta horizontal y dimensiones iguales para garantizar el nivel y división uniforme de la cantidad de agua, las

condiciones son difíciles de cumplir al hacerse para caudales menores a 100 mililitros por segundo, por el tamaño requerido.

En el caso del FIME en la Hacienda Majavita según *Vega Serrano (2013, p. 84)* la variación del caudal para un periodo 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, siendo un valor muy homogéneo, sin embargo se da un rango de variación de 10 ml/s correspondiente al 30% del valor medio.

En 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 taponan 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 a presión donde aplican el principio de Torricelli, sin embargo para las condiciones requeridas de diseño en este caso no son aplicables.

2.1. 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 *Rodríguez y Camargo (2013, p.47)* donde se utilizan para el diseño y 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.

Otro uso es en el modelamiento de fugas en tuberías a presión como el realizado por *Ávila y González (2006, p. 16)* donde se intentaba determinar los parámetros y 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 la 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 Olalla Procel (2012, p. 55) 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 cinco milímetros de diámetro para profundidades entre 12 y 45 centímetros y caudales de 32 a 56 mililitros por segundo utilizando el equipo mostrado en la figura 2, donde se aprecia el flujo de agua saliendo por un orificio controlado por una válvula.

Figura 2. Descarga de líquido por un orificio con válvula



Fuente: Olalla Procel 2012, p. 42

2.2. Formulación

Mediante la utilización de orificios circulares es posible medir, controlar, distribuir y dispersar con precisión el caudal, por ello se buscan ecuaciones experimentales para relacionar las variables: caudal, carga hidráulica/profundidad y diámetro del orificio.

2.3. Pregunta problema

¿Cuánta es la precisión en la medición y descarga de caudal mediante un orificio circular como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de agua?

2.4. Hipótesis

La precisión en la medición del caudal utilizando un orificio de pared delgada circular es mayor al 95% controlando la profundidad y es posible estimarlo mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple con correlación superior al 0.99.

2.5. Justificación

En la realización de proyectos de investigación a pequeña escala se necesita medir y distribuir caudales reducidos por ello se establece un modelo para la determinación del diámetro y profundidad requeridos a partir de datos experimentales.

2.6. Objetivo general

Determinar la precisión en la medición y descarga de caudal mediante un orificio circular como alternativa para sistemas de potabilización y tratamiento de agua.

2.7. Objetivos específicos

- 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 al diámetro y la profundidad.
- Establecer las ecuaciones de regresión lineal múltiple para estimar los caudales de salida a través del orificio.

3. METODOLOGÍA

3.1. Localización

El proyecto de investigación se realizó en el laboratorio de Hidráulica ubicado en la Hacienda Majavita propiedad de la Universidad Libre en la seccional del Socorro Santander Colombia.

3.2. Tipo de investigación

La clasificación del tipo de investigación se hace según Hernández Sampieri et al, (2006) siendo 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.

3.3. Definición de variables

Las variables establecidas a partir de los objetivos son las descritas en la tabla 2, mediante estas se determinó el patrón de comportamiento y su correlación.

Tabla 1. Variables y su clasificación

Tipo de variable	Variable	Unidad/clase
Dependiente (Respuesta)	Caudal	ml/s
	Velocidad	m/s
	Coefficiente de descarga	-
Independiente (Estímulo)	Diámetro del orificio	mm
	Carga hidráulica	cm
Parámetro	Espesor de la pared	mm

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.

3.4. 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.

3.5. 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 el coeficiente de correlación, promedio, desviación estándar y el 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 Chapra y Canale (2007) en su libro métodos numéricos para ingenieros 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.

3.6. 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 a la clasificación realizada por Azevedo y Acosta 1998.

Los experimentos se realizaron en dos condiciones diferentes, 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 diferentes profundidades desde un punto de rebose donde se instalaban las placas de acrílico con orificios para cada uno de los diámetros seleccionados.

Figura 3. Unidad de control y medición de caudal



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 litros mediante una tubería y una válvula metálica para controlar el caudal y la carga hidráulica respecto del centro del orificio como se observa en la figura 3.

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

3.7. Equipos de medición

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

3.8. 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.

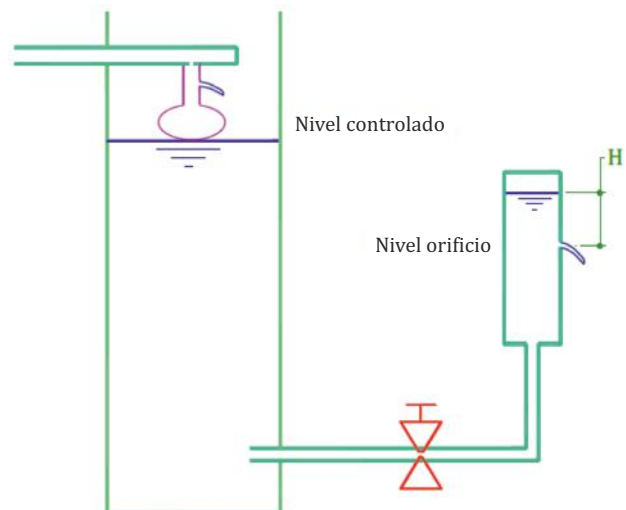
3.9. Población y muestra

En la estimación de los caudales a la salida del tanque se usaron cuatro diámetros: 3.2, 4, 6 y 7.9 milímetros y cinco profundidades: 11, 28, 43, 58 y 77 centímetros 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 20 datos con rangos de caudal de 9 a 132 mililitros por segundo.

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

En la figura 4 se tiene una representación del dispositivo utilizado para realizar las pruebas en el laboratorio.

Figura 4. Unidad de medición y control de caudal



4. RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas en el laboratorio y procesar los datos recopilados a continuación se hace una presentación de los principales resultados siendo una herramienta de diseño en los casos donde se requiera medición del caudal y descarga de agua a pequeña escala.

4.1. Medición de caudal mediante orificio con ecuación y coeficiente de descarga teóricos

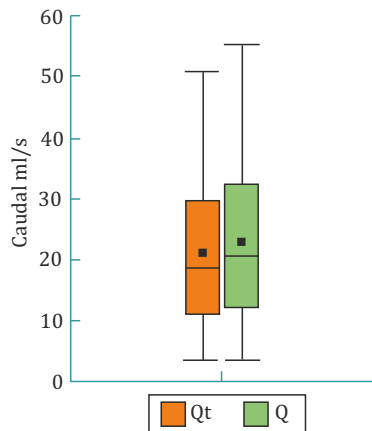
La estimación de la precisión de la ecuación teórica se realizó a partir del diámetro de cada orificio y de la profundidad respecto de la superficie del agua. Los valores del coeficiente de descarga se obtuvieron según Sotelo Ávila (1997, p. 208) dependiendo del Número de Reynolds (Re) para cada caso para una viscosidad del agua a una temperatura de 21 grados centígrados.

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 rango de 1,000 a 10,000.

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

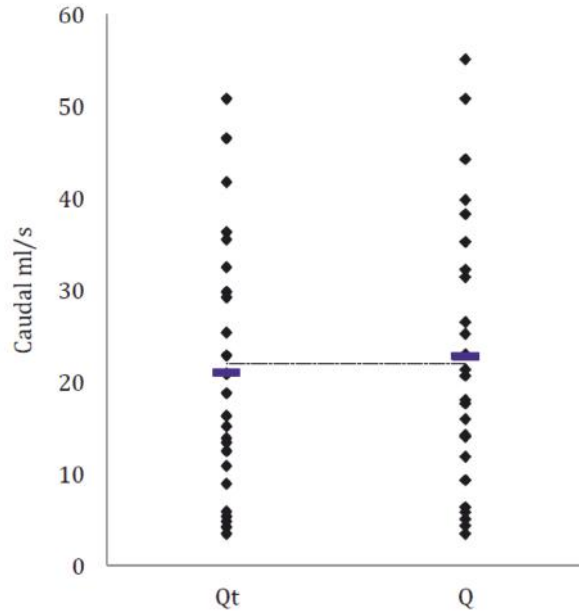
Utilizando la ecuación (2) se calcularon los coeficientes de descarga teóricos y luego con la ecuación (1) los caudales teóricos para compararon con los medidos obteniendo la figura 5 donde se aprecia la variación de los resultados entre caudales teóricos y medidos al observar promedios, medias y los intervalos obtenidos.

Figura 5. Caudales teórico (Qt) y medido (Q)



El rango de los caudales teóricos es menor en especial para los caudales más elevados, como se aprecia también en la figura 6 al realizar el análisis de varianza dando un p-value de 0.6665, sin darse diferencia significativa entre los dos caudales.

Figura 6. Análisis de varianza entre caudales teórico y medido



En las dos figuras anteriores se aprecia un valor promedio mayor para los caudales medidos, siendo el valor similar 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.

Tabla 1. Intervalos de uso de las variables

Variable		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

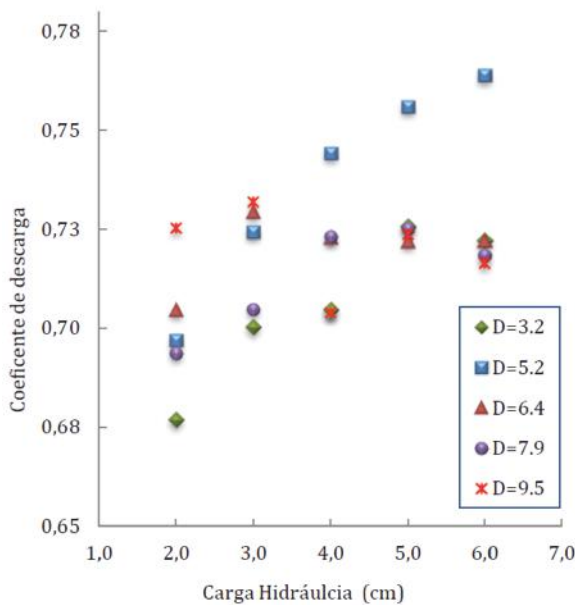
Los datos de la tabla permiten identificar los rangos en los cuales se hicieron las pruebas y son confiables los resultados.

4.2. 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 de 3%, siendo valores homogéneos, con un intervalo de confianza entre 0.712 y 0.727 al 95%. Sin embargo al utilizar el coeficiente 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 7, siendo directamente proporcionales sin ser una tendencia generalizada para todos los diámetros, como el caso de 6.4 mm donde la variación es mínima y la mayor es para el diámetro de 5.2 mm.

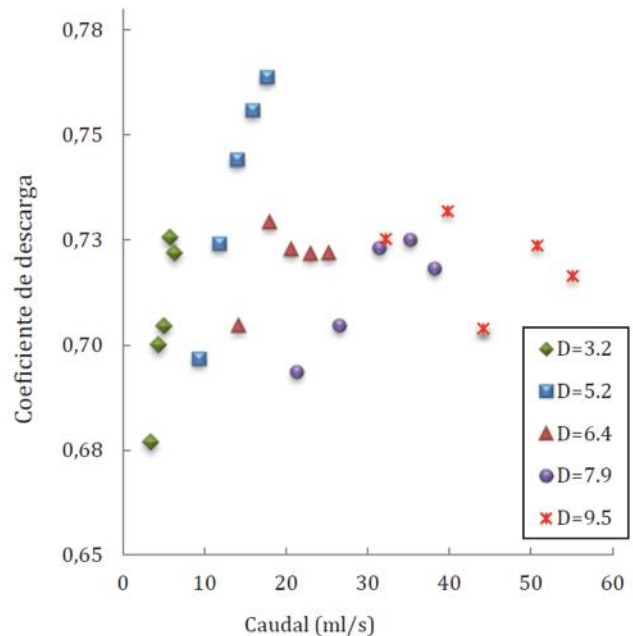
Figura 7. Coeficiente de descarga respecto de la profundidad y el diámetro del orificio aforador



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 8 se presenta la relación entre el coeficiente de descarga experimental respecto del caudal y los diámetros, apreciando una distribución diferente a la figura 6, 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.

Figura 8. Coeficiente de descarga experimental respecto del caudal y el diámetro del orificio



Por lo 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.

$$C_{de} = 0.70^{-0.004} H^{0.024} \quad (3)$$

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% siendo heterogéneo a pesar de la alta correlación. El 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.

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% siendo heterogéneo a pesar de la alta correlación. El 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.

Tabla 3. Coeficientes de descarga por diámetro

Diámetro		Coeficiente descarga			ErQ
mm	in	P	DE	CV	%
3	1/8	0.72	0.020	3%	2.0
5	13/64	0.75	0.027	4%	2.9
6.5	1/4	0.73	0.009	1%	0.9
8	5/16	0.71	0.013	2%	1.6
10	3/8	0.72	0.011	1%	1.1

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 al 3% siendo 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. Siendo mayores al 5% en los dos casos, al usar valores teóricos y al establecer el coeficiente experimental y usarlo en la ecuación teórica.

Tabla 4. Porcentajes de error de la ecuación teórica

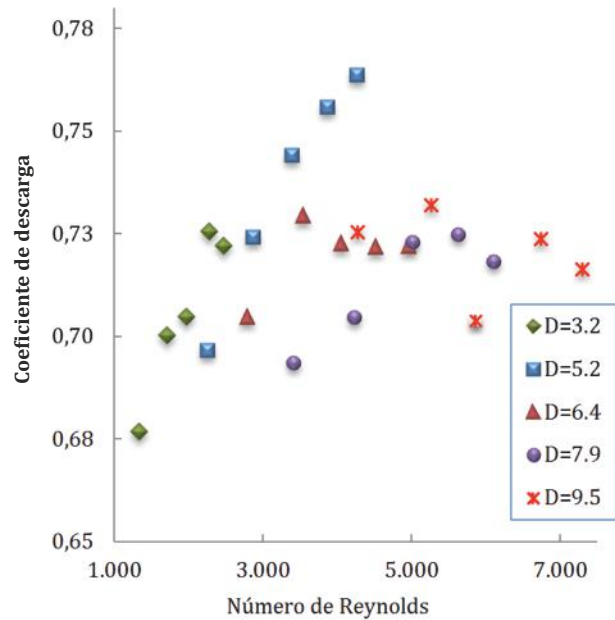
Errores	Teórico	Experimental
Promedio	7.2	6.9
Desviación estándar	2.9	2.8
Coefficiente variación	41	40
Mínimo	0.9	1.1
Máximo	12.8	12.6

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 tanto se obtiene una 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 de 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 sin tener tendencia definida como se puede ver en la figura 9.

Figura 9. Coeficiente de descarga experimental respecto del Número de Reynolds

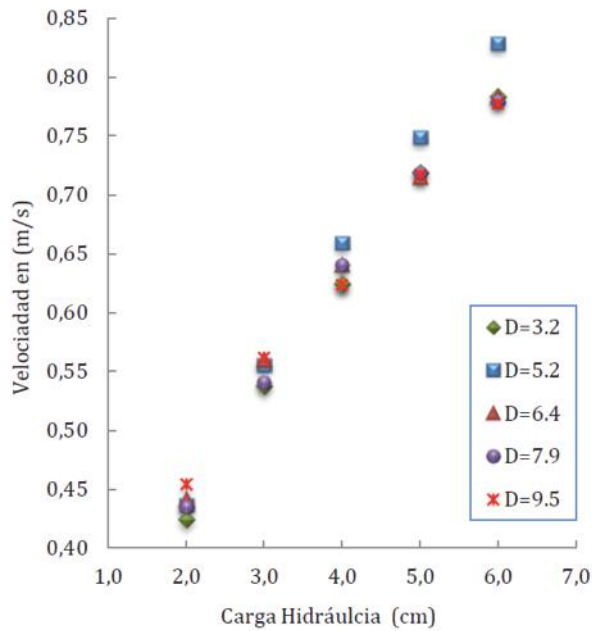


En el caso de los dos diámetros menores se presenta un incremento en el coeficiente de descarga, para los otros tres diámetros el valor fluctúa en un intervalo menor. Los valores más elevados del Reynolds corresponden a los diámetros mayores.

4.3. Variación del caudal y la velocidad por un orificio aforador

De acuerdo a 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.

Figura 10. Velocidad en el orificio aforador respecto de la profundidad y diámetro del orificio



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.

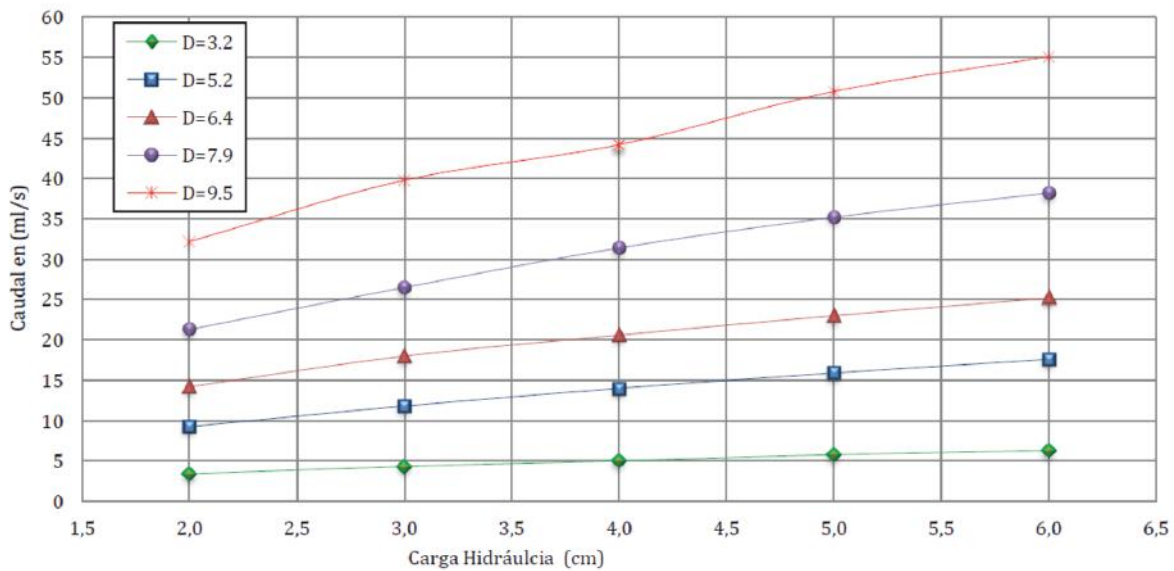
$$V = 0.3049H^{0.5377} \quad (4)$$

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, donde 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 que se presenta la mayor dispersión de los datos.

En la figura (11) 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.

Figura 11. Variación del caudal respecto de la profundidad y el diámetro en el orificio aforador



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.

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

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)

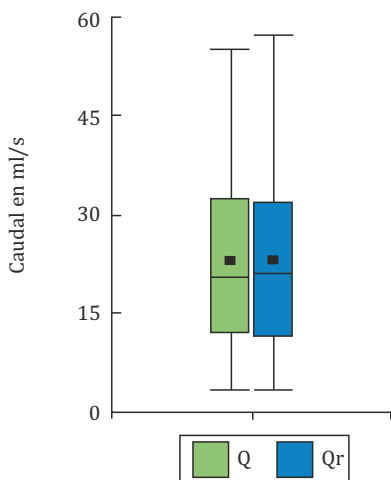
Tabla 5. Precisión de la ecuación de regresión

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

La precisión es mayor al 95% siendo aceptable y la menor se presenta en el diámetro de 5.2 mm dando un rango de 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%.

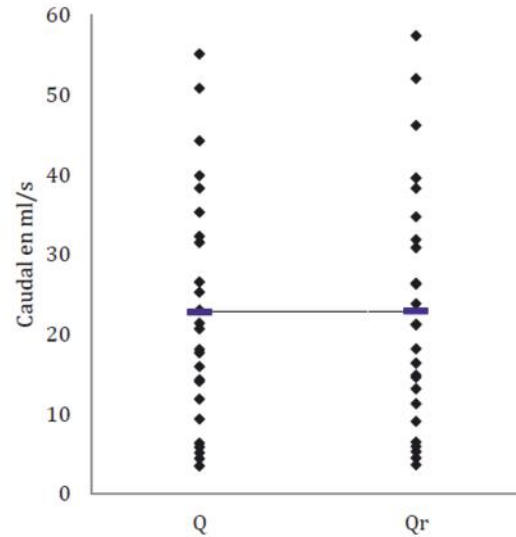
La figura 12 presenta la comparación entre caudales medidos y calculados con la ecuación de regresión lineal múltiple hallada.

Figura 12. Caudales medido (Q) y de regresión (Qr)



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 valores se realiza el análisis de varianza presentado en la figura 13.

Figura 13. Comparación entre caudales medido (Q) y de regresión (Qr)



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 donde se presentan las mayores diferencias.

4.4. Coeficiente de descarga experimental para orificio de salida libre

En esta segunda parte se presenta 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.

El tabla 6 se aprecia los intervalos de uso de las variables y las unidades de medida.

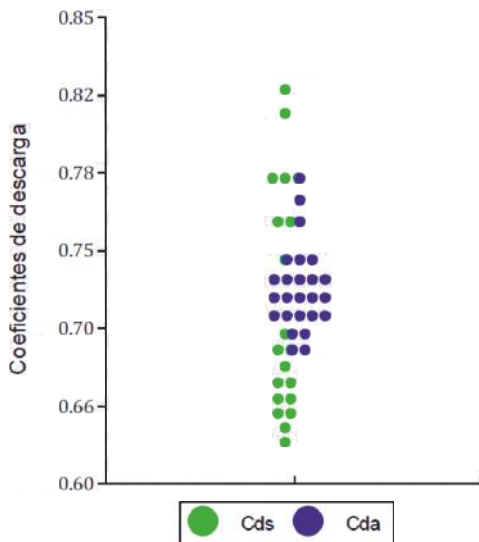
Tabla 6. Intervalos de uso de las variables

Variable		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

En este caso los rangos de caudal y profundidad son mayores para permitir usarlos en tanques con volúmenes de 1000 litros con alturas de un metro.

En la figura 14 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 siendo mayor la cantidad de valores en el primer grupo sin tener valores próximos al promedio.

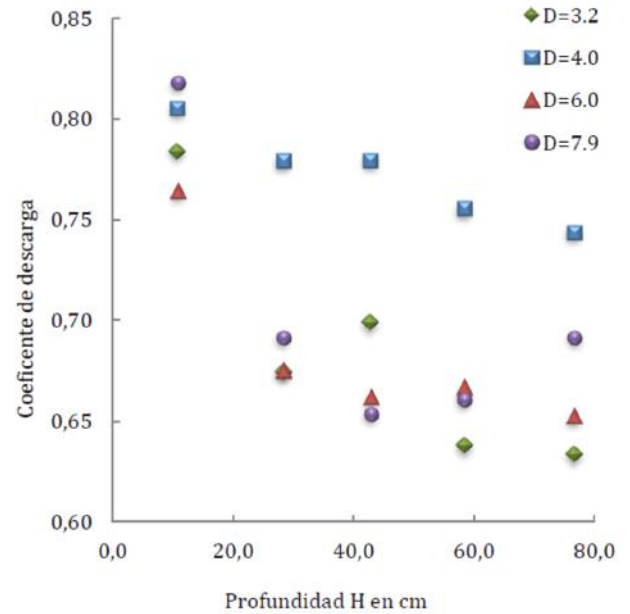
Figura 14. Distribución coeficientes de descarga



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

El comportamiento de los coeficientes se complementa con la figura 15 donde 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.

Figura 15. Distribución coeficientes de descarga



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

Tabla 7. Coeficientes de descarga experimental por diámetro

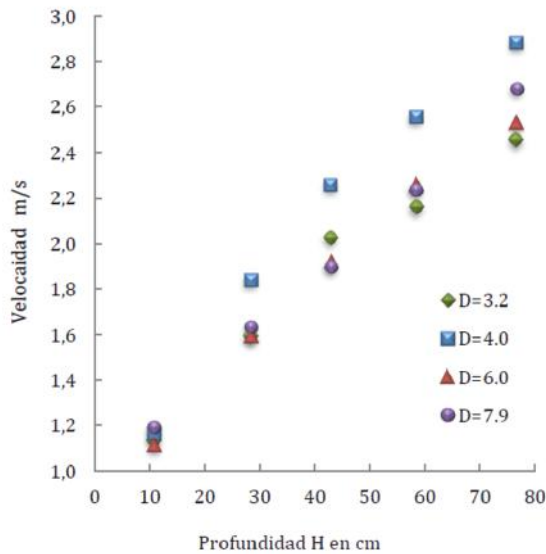
Diámetro		Cde			ErQ
mm	in	P	DE	CV	%
3.2	1/8	0.69	0.061	9%	6.4
4.0	5/32	0.77	0.024	3%	2.4
6.0	15/64	0.68	0.046	7%	4.5
7.9	5/16	0.70	0.067	9%	6.3
Promedio		0.71	0.049	7%	4.9

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 deben buscar otra forma de relacionar las variables estudiadas.

4.5. 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 siendo 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 16. Comportamiento velocidad de salida



Las mayores velocidades se dan en el diámetro de 4.0 mm para todas las profundidades exceptuando 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 17 siendo muy clara la tendencia y la correlación entre las variables y el incremento por los diámetros para una misma profundidad.

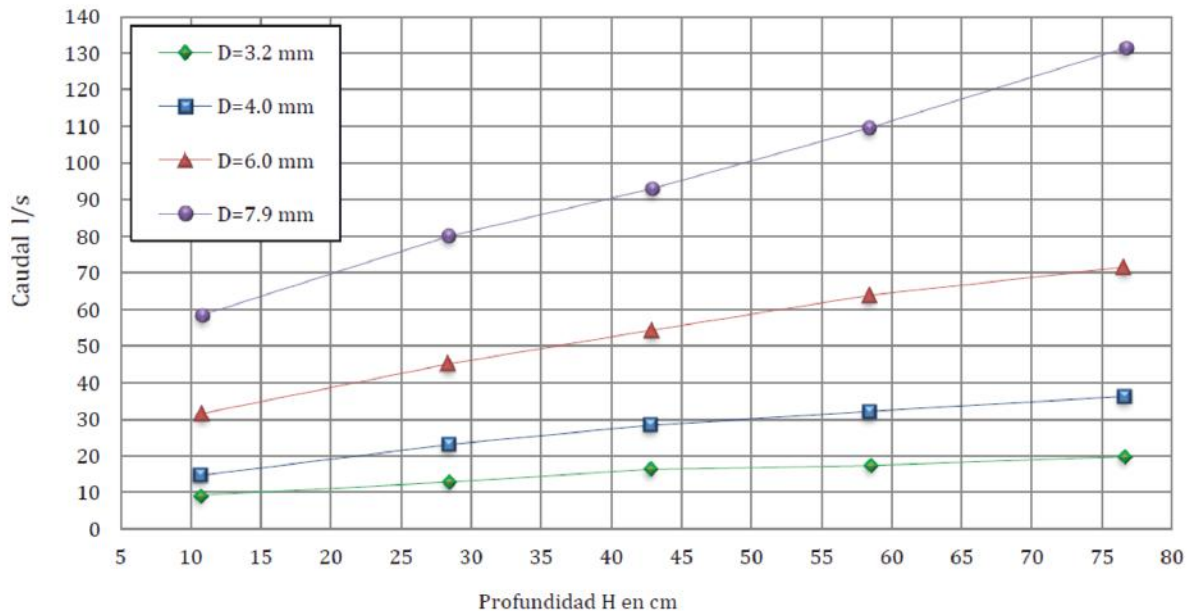
El capacidad de descarga casi se duplica del diámetro de 6.0 mm al de 7.9 con un aumento de 1.9 mm, por tanto al requerirse más caudal de salida se deben hacer pequeños incrementos en el diámetro del orificio.

La mayor correlación 0.9989 se presenta en el diámetro de 7.9 mm y la menor 0.9808 para 3.2 mm, siendo 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, siendo más notoria la influencia del diámetro en el caudal.

$$Q_r = 0.43338D^{1.8428}H^{0.4192} \quad (6)$$

Figura 17. Caudal de salida por el orificio de descarga libre



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

Tabla 8. Precisión de la ecuación de regresión

Parámetro	(%)
Promedio	94.4
Desviación estándar	1.8
Coefficiente de variación	52
Mediana	96.5
Mínima	93.0
Máxima	99.5

Los resultados son similares a la ecuación para orificios aforadores donde la precisión fue mayor, en este caso el coeficiente de variación fue inferior por tener una menor dispersión de los errores en cada caudal.

4.6. Medidor de caudal mediante orificio circular en un UASB y un FGDí

Con los resultados obtenidos se han diseñado aplicaciones del medidor de orificio, en la figura 18 se observa un ejemplo instalada 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.

Figura 18. Medidor de caudal de orificio circular



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 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 en 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 una 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.

5. DISCUSIÓN

En la ecuación teórica presentada en Sotelo Ávila (1997, p. 204) para el cálculo del caudal de salida 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% siendo 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% siendo una diferencia considerable.

En la figura utilizada en el libro de Sotelo Ávila (1997, p. 208) 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 Olalla Procel (2012, p. 55), encontró un coeficiente de descarga promedio de 0.65 para una orificio de cinco milímetros de diámetro, los resultados encontrados en esta caso son mayores a 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 Rodríguez y Camargo (2013, p.47) 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 dos milímetros.

En el modelamiento de fugas en tuberías a presión como el realizado por Ávila y González (2006, p. 16) se obtiene una ecuación para cuatro variables con un coeficiente de correlación de 0.954, en este caso se logran mayores al 0.985 únicamente con tres variables.

6. CONCLUSIONES

En la estimación del caudal mediante un orificio con la ecuación teórica utilizando coeficientes de descarga teóricos y experimentales los errores obtenidos para en promedio son superiores al 5%, sin embargo al utilizar los valores experimentales hallados para cada diámetro los resultados son mejores, teniendo la limitación de usar 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 Numero de Reynolds donde 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 los variables analizadas, por ello es 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 mililitros por segundo 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 donde se requiera estimar el diámetro y profundidad para obtener un caudal especificado.

6.1. Recomendaciones

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.

6.2. Planes para el trabajo futuro

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.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila Rangel, Humberto y González Barreto, Carolina. 2006. Determinación de parámetros de fuga para fallas longitudinales, en conexiones domiciliarias y en uniones de tuberías en PVC. Revista de ingeniería No 24. Universidad de los Andes. ISSN. 0121-4993. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n24/n24a3>
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. 2006. Metodología de la Investigación. 4 ed. Mc Graw Hill.
- Olalla Procel, Carlota Georgina. 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. Facultad de Ciencias. Escuela de Ingeniería Química. Riobamba – Ecuador. <http://dspace.esepoch.edu.ec/bitstream/123456789/2502/1/96T00182.pdf>
- Rodríguez Cárdenas, Henry Said y Camargo, Sergio Andrés. 2013. Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá D.C. <http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/77/1/Trabajo%20de%20Grado.pdf>
- Rueda González, Mariluz, Velasco Poveda, Leidy Tatiana y Vega Serrano, Haimar Ariel. 2013. Evaluación de la eficiencia de los sistemas de filtración en múltiples etapas FiME en unidades de concreto y plástico en la Hacienda Majavita. Revista El Centauro: No 8. Universidad Libre Seccional Socorro. ISSN: 2027-1212. Págs.: 77 - 87.
- Salazar Salas, Lady Alexandra; Quiroga Mateus, Ruth Yesenia, Castillo Rojas, Luis Fernando y Vega Serrano, Haimar Ariel. 2013. Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita. Revista Innovando en la U. Universidad Libre Seccional Socorro. ISSN: 2216-1236. No. 5. Págs.: 41-55.
- Sotelo, Ávila Gilberto. 1997. Hidráulica General. Fundamentos. Vol 1. Editorial Limusa. Págs.: 510.
- Vega Serrano, Haimar Ariel (2013). Evaluación del Sistema de Filtración en Múltiples Etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado en la Hacienda Majavita (Socorro, Santander). Informe final de maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Universidad de Manizales. Págs.: 117.