



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES
CON DIÁMETROS VARIABLES**

Claudia María Ramírez Guerra

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, junio de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES
CON DIÁMETROS VARIABLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CLAUDIA MARÍA RAMÍREZ GUERRA

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES CON DIÁMETROS VARIABLES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 22 de octubre de 2015.

Claudia María Ramírez Guerra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 13 de Febrero de 2017

Ingeniero

Claudio Cesar Castañón Contreras

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación de la estudiante Claudia María Ramírez Guerra, quien se identifica con carné No. 2012-12690, titulado CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES CON DIÁMETROS VARIABLES, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado N.º 6496

Docente Departamento de Hidráulica





USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
22 de mayo de 2017

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES CON DIÁMETROS VARIABLES, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Claudia María Ramírez Guerra, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica

/bbdeb.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



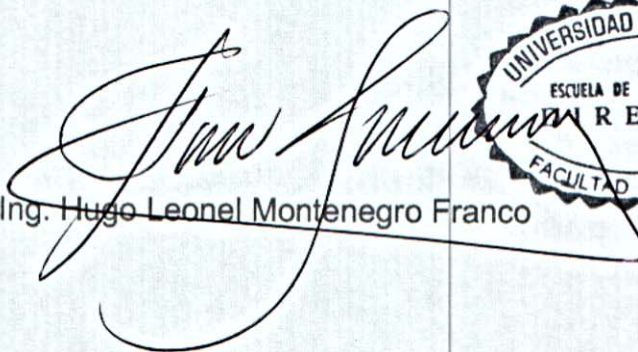
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Coordinador del Departamento Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación de la estudiante Claudia María Ramírez Guerra **CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO EN ORIFICIOS CIRCULARES CON DIÁMETROS VARIABLES** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio 2017

/mrrm.



Más de 136 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

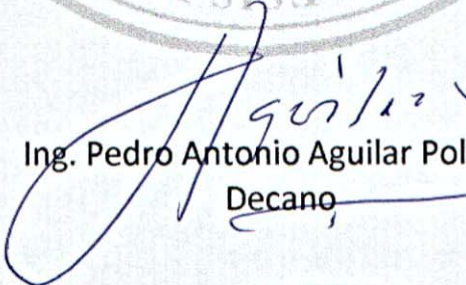


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 277.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CALIBRACIÓN DE LA ECUACIÓN DE FLUJO DE ORIFICIOS CIRCULARES CON DIÁMETROS VARIABLES**, presentado por la estudiante universitaria: **Claudia María Ramírez Guerra**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, junio de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Antonio Ramírez y Amparito Guerra, por su amor, confianza y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Fernando, Raúl y Cristian por ser la motivación para seguir ocupándome en mis sueños.
Mis abuelas	Elvia Cruz y Lina Erazo. Por ser dos ángeles en mi vida.
Zoila Cruz	Por todos sus cuidados y muestras de amor a lo largo de mi vida.
Mis tíos	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Vilma Pensabene y Beatriz Abril	Por mostrarme su apoyo y cariño en mi vivir.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por proveerme de sabiduría y sustento diario.
Mis padres	Por la gran muestra de amor recibida a lo largo de mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser, hasta el momento, la cuna de la etapa académica más memorable.
Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza	Por el apoyo y cariño brindado en mi carrera universitaria y en la elaboración de esta tesis.
Bernabé de León	Por su disposición, apoyo y cariño incondicional en la elaboración de esta tesis, y por recordarme la importancia de Dios en mi andar.
Familia De León Rivera	Por el cariño y apoyo en la obtención de tan anhelado sueño.
Ing. Mario Corzo	Por todas las muestras de cariño, apoyo e inspiración.
Fabio Sánchez	Por todas las vivencias compartidas y consejos recibidos.

Byron Arriola y familia

Por el suministro del material utilizado para elaborar los ensayos de esta tesis, así como por su disposición y cariño de toda su familia

Mis amigos

Por el apoyo mutuo en nuestra formación profesional que me permitieron compartir buenos momentos: Alexis Bardales, Johnny Bravo, Bertha Solís, Katherine Lara y Melzar de León.

2.	PRINCIPIOS HIDRÁULICOS EN ORIFICIOS CIRCULARES DE PARED DELGADA.....	15
2.1.	Orificios circulares de pared delgada	15
2.1.1.	Funcionamiento hidráulico.....	15
2.1.2.	Ecuaciones de cálculo del caudal	16
2.1.3.	Coeficiente de contracción	19
2.1.4.	Coeficiente de velocidad	20
2.1.5.	Coeficiente de descarga.....	20
2.1.6.	Cálculo de la velocidad real.....	22
3.	ENSAYO DE ORIFICIOS CON DESCARGA LIBRE.....	27
3.1.	Criterios para el dimensionamiento de los diámetros del orificio.....	27
3.2.	Material de construcción	27
3.3.	Límites de aplicación.....	28
3.4.	Procedimiento experimental.....	30
3.5.	Ensayo de orificios circulares.....	33
3.5.1.	Datos obtenidos	36
3.5.1.1.	Modelo matemático núm. 1	56
3.5.1.2.	Modelo matemático núm. 2	69
3.5.2.	Obtención de modelos matemáticos con programa estadístico SPSS	80
3.5.2.1.	Modelo matemático núm. 3	81
3.5.2.2.	Modelo matemático núm. 4	85
3.5.3.	Comparación de modelos matemáticos	86
3.5.4.	Gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d	96

CONCLUSIONES 99
RECOMENDACIONES..... 101
BIBLIOGRAFÍA..... 103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Orificio en almacenamiento con flujo permanente	1
2.	Orificio con borde biselado	2
3.	Orificio circular	4
4.	Orificio con descarga libre	5
5.	Orificios circulares sumergidos	6
6.	Orificio de pared delgada	7
7.	Orificio de pared gruesa	8
8.	Orificios de tubos cortos	9
9.	Boquilla cilíndrica de borda	10
10.	Boquilla cilíndrica externa	11
11.	Tubo cónico divergente	12
12.	Tubo cónico convergente	14
13.	Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds	22
14.	Tubo Pitot	23
15.	Montaje del tubo de Pitot utilizado en el ensayo	25
16.	Foto de una placa metálica	28
17.	Área del canal del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica ...	29
18.	Tanque metálico de succión por bomba	30
19.	Canal con paredes de acrílico	31
20.	Tanque volumétrico	31
21.	Cronómetro digital	32
22.	Medición de diámetro del orificio	33

23.	Carga regulada aguas arriba del orificio	33
24.	Descarga libre por orificio	34
25.	Aforo volumétrico	34
26.	Medición de diámetro en la sección contraída	35
27.	Implementación de tubo de Pitot en ensayo de orificio de 3,10 cm	36
28.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 9,56 cm de diámetro	57
29.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 3,10 cm de diámetro	59
30.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 5,10 cm de diámetro	60
31.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 6,02 cm de diámetro	61
32.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 7,30 cm de diámetro	62
33.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 8,38 cm de diámetro	63
34.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 8,94 cm de diámetro	64
35.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 11,78 cm de diámetro	65
36.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 13,33 cm de diámetro	66
37.	Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 15,06 cm de diámetro	67
38.	Gráfico del diámetro vs factor de corrección	68
39.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 9,56 cm de diámetro	70

40.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 3,10 cm de diámetro.....	72
41.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 5,10 cm de diámetro.....	73
42.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 8,38 cm de diámetro.....	74
43.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 8,94 cm de diámetro.....	75
44.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 11,78 cm de diámetro.....	76
45.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 13,33 cm de diámetro.....	77
46.	Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 15,06 cm de diámetro.....	78
47.	SPSS Statistics 22 programa estadístico informático	81
48.	Análisis de regresión no lineal.....	83
49.	Estimación de parámetros.....	83
50.	Análisis de regresión no lineal.....	84
51.	Estimación de parámetros.....	85
52.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 3,10 cm de diámetro.....	87
53.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 5,10 cm de diámetro	88
54.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 7,30 cm de diámetro	89
55.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 6,02 cm de diámetro	90
56.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,38 cm de diámetro	91

57.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,94 cm de diámetro	92
58.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 9,56 cm de diámetro	93
59.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 11,78 cm de diámetro	94
60.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 13,33 cm de diámetro	95
61.	Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 15,06 cm de diámetro	96
62.	Gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d	98

TABLAS

I.	Tabla de toma de datos	32
II.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 9,56 cm de diámetro	37
III.	Tabla con volúmenes correspondientes a cada uno de los aforos practicados en orificio de 9,56 cm de diámetro	38
IV.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 3,10 cm de diámetro	38
V.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 5,10 cm de diámetro	39
VI.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 6,02 cm de diámetro	39
VII.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 7,30 cm de diámetro	40
VIII.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 8,38 cm de diámetro	40
IX.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 8,94 cm de diámetro	41
X.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 11,78 cm de diámetro	41
XI.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 13,33 cm de diámetro	42
XII.	Tabla de datos obtenidos en orificio de 15,06 cm de diámetro	42
XIII.	Caudales observados en orificio de 9,56 cm de diámetro	43

XIV.	Caudales observados en orificio de 3,10 cm de diámetro.....	43
XV.	Caudales observados en orificio de 5,10 cm de diámetro.....	44
XVI.	Caudales observados en orificio de 6,02 cm de diámetro.....	44
XVII.	Caudales observados en orificio de 7,30 cm de diámetro.....	45
XVIII.	Caudales observados en orificio de 8,38 cm de diámetro.....	45
XIX.	Caudales observados en orificio de 8,94 cm de diámetro.....	45
XX.	Caudales observados en orificio de 11,78 cm de diámetro.....	46
XXI.	Caudales observados en orificio de 13,33 cm de diámetro.....	46
XXII.	Caudales observados en orificio de 15,06 cm de diámetro.....	47
XXIII.	Resultados orificio de 9,56 cm de diámetro	52
XXIV.	Resultados orificio de 3,10 cm de diámetro	52
XXV.	Resultados orificio de 5,10 cm de diámetro	53
XXVI.	Resultados orificio de 6,02 cm de diámetro	53
XXVII.	Resultados orificio de 7,30 cm de diámetro	54
XXVIII.	Resultados orificio de 8,38 cm de diámetro	54
XXIX.	Resultados orificio de 8,94 cm de diámetro	55
XXX.	Resultados orificio de 11,78 cm de diámetro	55
XXXI.	Resultados orificio de 13,33 cm de diámetro	56
XXXII.	Resultados orificio de 15,06 cm de diámetro	56
XXXIII.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 9,56 cm de diámetro	57
XXXIV.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 3,10 cm de diámetro	58
XXXV.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 5,10 cm de diámetro	59
XXXVI.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 6,02 cm de diámetro	60
XXXVII.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 7,30 cm de diámetro	61

XXXVIII.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 8,38 cm de diámetro	62
XXXIX.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 8,94 cm de diámetro	63
XL.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 11,78 cm de diámetro	64
XLI.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 13,33 cm de diámetro	65
XLII.	Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 15,06 cm de diámetro	66
XLIII.	Factores de corrección para la ecuación de calibración del caudal generado.....	67
XLIV.	Factores de corrección válidos generados por los gráficos de caudal teórico vs caudal observado.....	68
XLV.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 9,56 cm de diámetro	69
XLVI.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 3,10 cm de diámetro	71
XLVII.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 5,10 cm de diámetro	72
XLVIII.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 6,02 cm de diámetro	73
XLIX.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 8,94 cm de diámetro	74
L.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 11,78 cm de diámetro	75
LI.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 13,33 cm de diámetro	76

LII.	Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 15,06 cm de diámetro	77
LIII.	Factores de corrección para la ecuación de calibración del caudal generado.	78
LIV.	Ecuaciones del modelo matemático Núm. 2	79
LV.	Valores del gráfico generado y observado vs carga para el orificio de 3,10 cm de diámetro.....	86
LVI.	Valores del gráfico de caudales generado y observado vs carga para el orificio de 5,10 cm de diámetro	87
LVII.	Valores del gráfico caudales generado y observado vs carga para el orificio de 6,02 cm de diámetro	88
LVIII.	Valores del gráfico de caudales generado y observado vs carga para el orificio de 7,30 cm de diámetro	89
LIX.	Valores del gráfico caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,38 cm de diámetro	90
LX.	Valores del gráfico caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,94 cm de diámetro	91
LXI.	Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 9,56 cm de diámetro	92
LXII.	Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 11,78 cm de diámetro	93
LXIII.	Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 13,33 cm de diámetro	94
LXIV.	Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 15,06 cm de diámetro	95
LXV.	Valores del gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d	96

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Aceleración de la gravedad
cm	Altura de carga sobre vertedero
y	Área de la sección contraída
k	Área de la sección del orificio de pared delgada
s	Caudal o gasto
A	Caudal real
t	Caudal teórico
g	Centímetro
Vr	Centímetros por segundo
l	Coeficiente
Qr	Diferencial de carga
vol	Coeficiente de contracción
Vt	Coeficiente de descarga
Ac	Coeficiente de velocidad
Qt	Diámetro de la sección contraída
cm/s	Litros
Cc	Litros por segundo
Cd	Número correlativo
Cd	Número de Reynolds
l/s	Peso específico
φc	Presión
No	Segundo
Re	Tiempo

γ

Velocidad real

P

Velocidad teórica

Δh

Volumen

GLOSARIO

Aforo	Conjunto de operaciones para determinar el caudal en un curso de agua para un volumen y tiempo determinado.
Biselado	Corte oblicuo en el borde de una superficie.
Canal	Es un conducto en el cual el líquido fluye con una superficie libre.
Caudal	Es una elevación de superficie de la superficie del fluido, expresada en unidades de longitud.
Deflexión	Es la desviación de la dirección de la corriente del flujo.
Desnivel	Cambio de alturas en los líquidos.
Diámetro contraído	Diámetro de la sección contraída de la vena a descarga libre.
Empuje	Fuerza producida a un cuerpo por un fluido.
Fluido	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzos de corte.

Flujo	Movimiento de un fluido que atraviesa una sección transversal.
Piezómetro	Instrumento utilizados para medir la presión del agua.
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences.</i>
Vena contraída	La sección que ha sufrido estrangulación en el paso de flujo.

RESUMEN

La presente investigación trata del estudio de los principios hidráulicos de funcionamiento de los orificios circulares de pared delgada con descarga libre y del procedimiento para la calibración de una ecuación de flujo con distintos diámetros.

El capítulo 1 describe la medición de caudales en orificios circulares que drenan líquidos con condiciones de altura de carga y su clasificación.

El capítulo 2 explica los principios hidráulicos y las ecuaciones deducidas por algunos investigadores que determinan el caudal en los orificios circulares de pared delgada y los límites de aplicación empleados en los ensayos.

En el capítulo 3 se deducen 4 modelos matemáticos que generan un caudal lo más cercano al caudal real observado que permite determinar las ecuaciones experimentales para compararlas con ecuaciones teóricas desarrolladas; para este análisis fue necesario considerar las condiciones físicas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, debido a que son parámetros para la variación de los resultados.

Para las ecuaciones determinadas para los orificios de paredes delgadas ensayados se consideró la contracción de la vena líquida en caída libre posterior a la salida del flujo; esta sección contraída será determinante para obtener el valor de velocidad real, volumen y, por consiguiente, el caudal que atraviesa la estructura hidráulica.

Los parámetros estimados encontrados en esta investigación siguen la tendencia de los resultados en procesos experimentales desarrollados anteriormente, que muestran factores de corrección para las discrepancias en una descarga teórica, que pueden ser atribuidas a la agudeza del bisel así como a la carga sobre el orificio.

OBJETIVOS

General

Elaborar y calibrar la ecuación de flujo en orificios circulares de pared delgada, cada uno con un diámetro diferente.

Específicos

1. Determinar los coeficientes de velocidad, contracción y descarga para las ecuaciones de orificios
2. Simular y analizar el comportamiento del flujo a través de orificios circulares de pared delgada.
3. Comparar resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente, mediante la realización de los ensayos de laboratorio.
4. Determinar la precisión de las ecuaciones de tal manera que pueda obtenerse un factor que relacionen el caudal con la carga en los orificios ensayados.
5. Emplear un *software* estadístico como SPSS que permita generar modelos matemáticos que relacionen el caudal con la carga en los orificios ensayados.

INTRODUCCIÓN

El agua es el líquido vital para los seres humanos, las plantas y los animales; es el principal componente que mantiene en equilibrio el medio ambiente y, además, resulta ser un insumo fundamental en cualquier actividad de la vida humana. En la actualidad resulta de suma importancia tener un control sobre el uso de este recurso.

Un inventario de los recursos hídricos se logra a través de aforos, que a su vez no son más que mediciones realizadas para calcular el caudal, gasto o descarga que puede existir en un río o cualquier curso de agua; dicha importancia puede verse desde diferentes puntos de vista, por ejemplo, saber la disponibilidad de agua con que se cuenta, distribuir el agua a los usuarios en la cantidad deseada, saber el volumen de agua con que se riegan los cultivos, para poder determinar la eficiencia de uso y de manejo y así evitar el desperdicio.

Dada la importancia de estas mediciones, no está demás enfatizar la necesidad de utilizar métodos eficaces para realizar el estudio hidrológico de ríos, según en el análisis estadístico de una larga secuencia de datos obtenidos por medidas continuas. Para esas diversas aplicaciones se han desarrollado en el transcurso de los años una multitud de dispositivos que brinda la descarga en función de variables como la carga, presión, etc. Todos se basan en las leyes físicas fundamentales de la mecánica de los fluidos.

En el área rural, suelen utilizarse distribuidores de caudal que conducen agua hacia las viviendas de la localidad y para el riego en las plantaciones agrícolas.

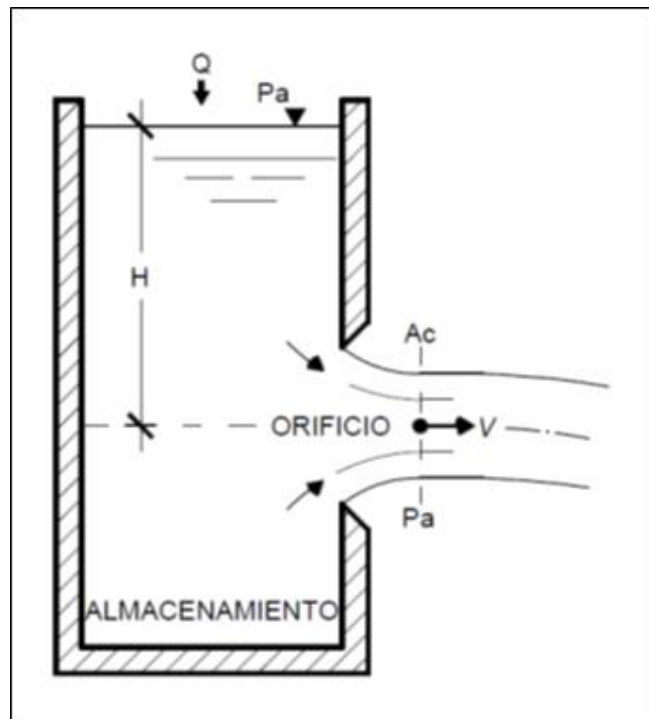
Entre los medidores de flujo, específicamente para canales abiertos, están los orificios circulares de pared delgada con descarga libre que brinda valores de caudal aceptables en función de la carga hidráulica que existe sobre ellos.

1. GENERALIDADES DE TECNIFIBRAS, S. A.

1.1. Orificios

Los orificios son aberturas, con formas regulares y perímetro cerrado, que permiten drenar líquidos bajo condiciones constantes de altura de carga o vaciado de depósitos, almacenamientos, tanques, canales y tuberías, utilizados en ingeniería hidráulica para la medición de flujo, en canales y tanques de almacenamiento

Figura 1. Orificio en almacenamiento con flujo permanente

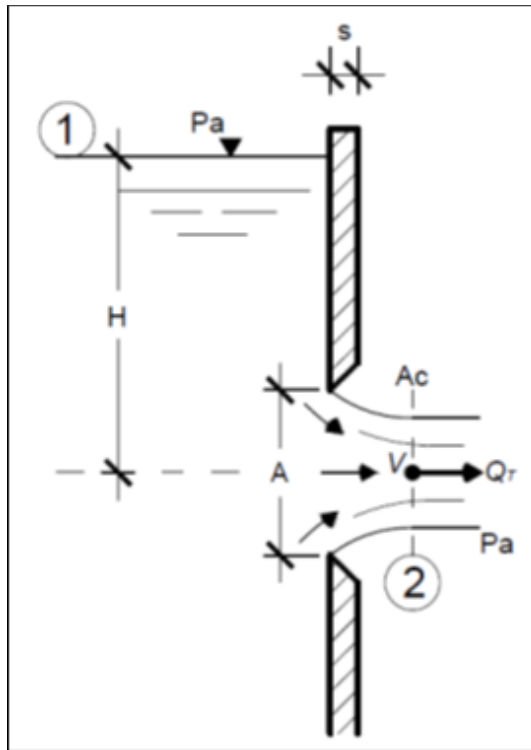


Fuente: elaboración propia.

1.1.1. Definición y uso

Al perforar un agujero en la placa o pared delgada de un sistema de almacenamiento de fluidos, se generan aristas agudas y bien definidas en la superficie interna de la pared del almacenamiento.

Figura 2. Orificio con borde biselado



Fuente: elaboración propia.

Un orificio permite el aforo de cualquier líquido que se descarga por el mismo y contribuye al diseño de gran cantidad de estructuras hidráulicas. La peculiaridad de los orificios radica en el bisel de la superficie interna de la pared ya que es el único contacto con el líquido que se descarga.

1.1.2. Clasificación de orificios

Los orificios se clasifican de acuerdo a las condiciones del nivel del líquido aguas abajo para su implementación:

- Orificios con descarga libre
- Orificios parcialmente sumergidos

Según el nivel de la superficie libre del líquido:

- Orificios de nivel constante
- Orificios de nivel variable

También se clasifican por la forma geométrica de sus aristas:

- Orificios circulares
- Orificios rectangulares
- Orificios cuadrados

Otra forma de clasificación (es por la dimensión del orificio (d) relativamente a la profundidad del agua hasta el centroide del orificio (H):

- Si $d < \frac{1}{3} H$; orificio pequeño
- Si $d > \frac{1}{3} H$; orificio grande

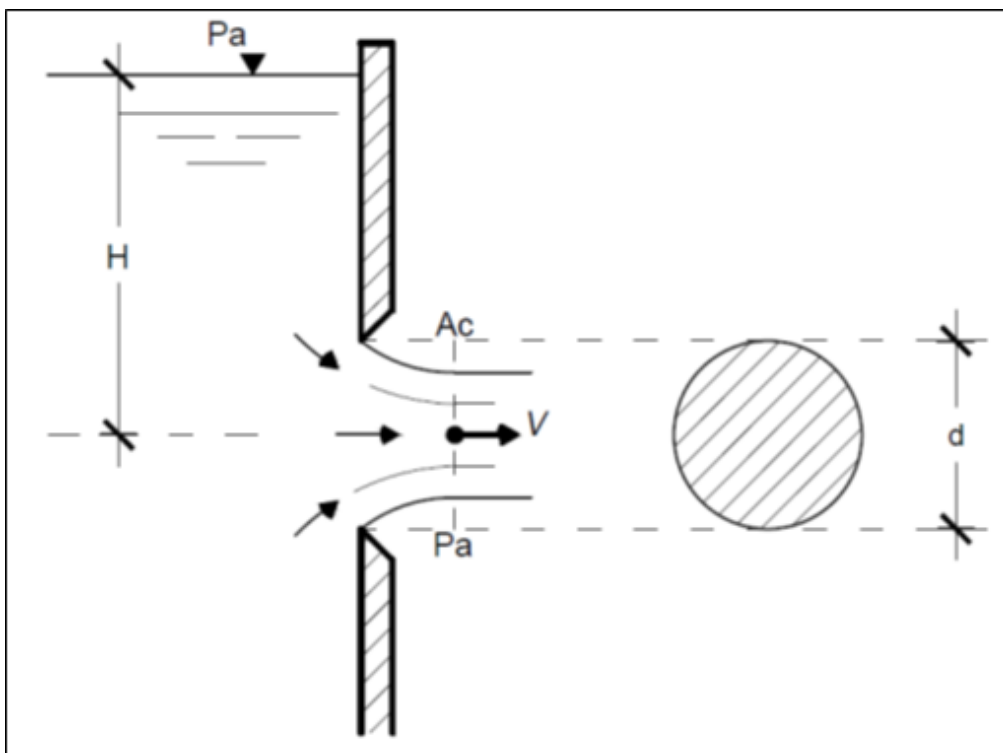
Y bien, pueden clasificarse según el espesor de la pared:

- Orificios de pared delgada
- Orificios de pared gruesa

1.1.2.1. Orificios circulares

Son llamados orificios circulares porque las aristas del perímetro, por donde fluye el líquido, tienen la forma de una circunferencia cerrada.

Figura 3. Orificio circular

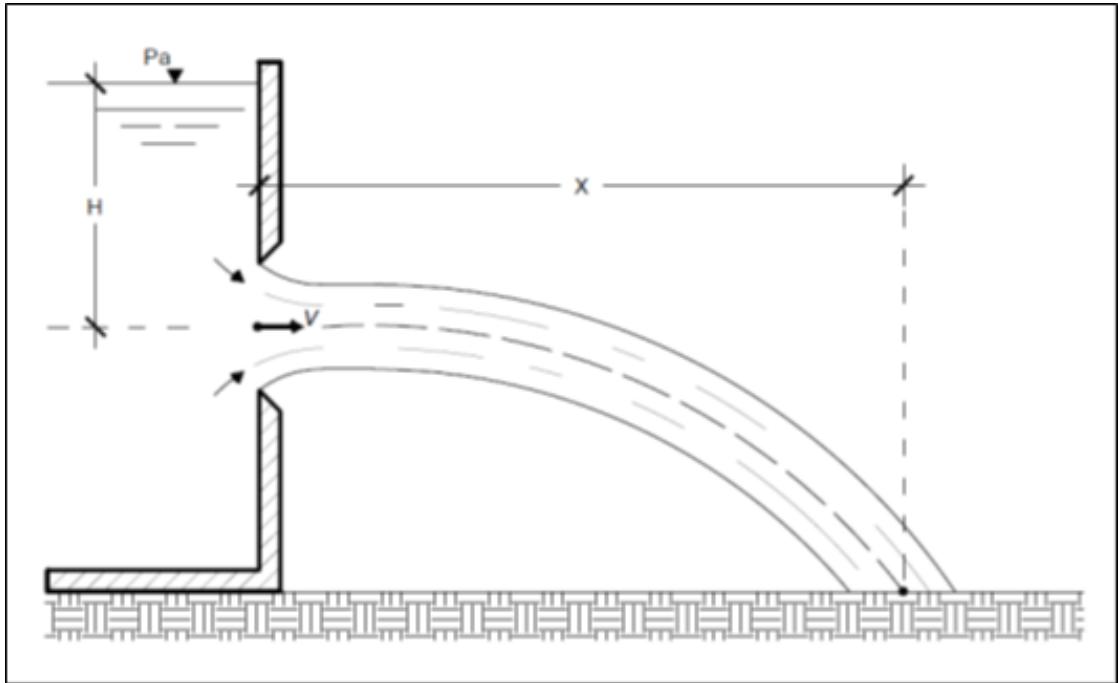


Fuente: elaboración propia.

1.1.2.2. Orificios con descarga libre o chorros

Estos orificios drenan el flujo del líquido de manera libre a la atmósfera hacia una superficie por debajo de su altura, mostrando una trayectoria parabólica durante la descarga del líquido

Figura 4. Orificio con descarga libre



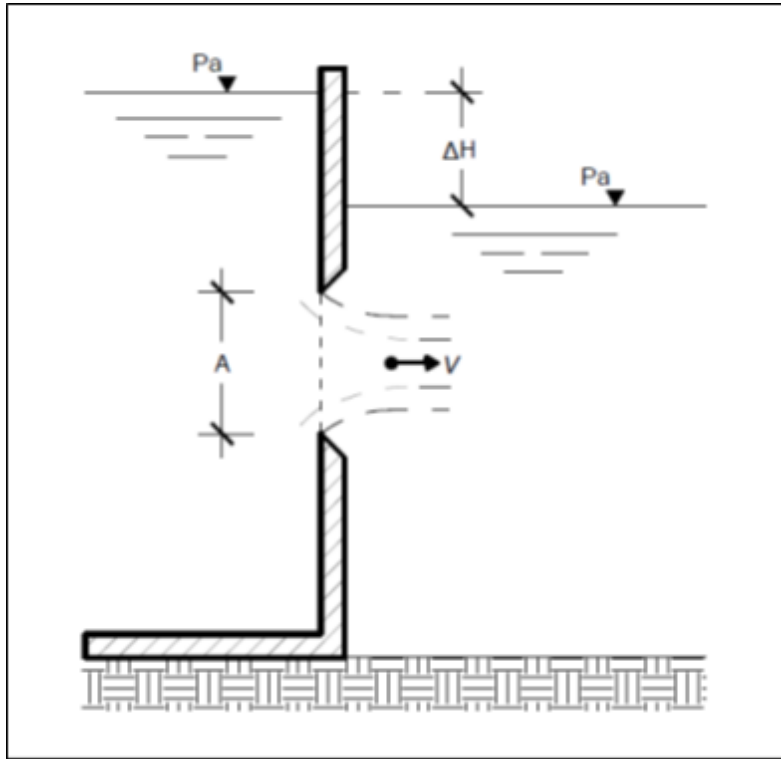
Fuente: elaboración propia.

1.1.2.3. Orificios circulares sumergidos o ahogados

Estos orificios descargan fluidos de un sistema de almacenamiento a otro sistema, cuyo nivel libre de líquido está sobre el punto más bajo del orificio.

Las dimensiones de los orificios sumergidos pueden ser fijas o ajustables; las dimensiones fijas se usan cuando el flujo del líquido no es suficiente para la operación de los sistemas, mientras que los orificios sumergidos ajustables permiten modificación en el área de descarga.

Figura 5. **Orificios circulares sumergidos**

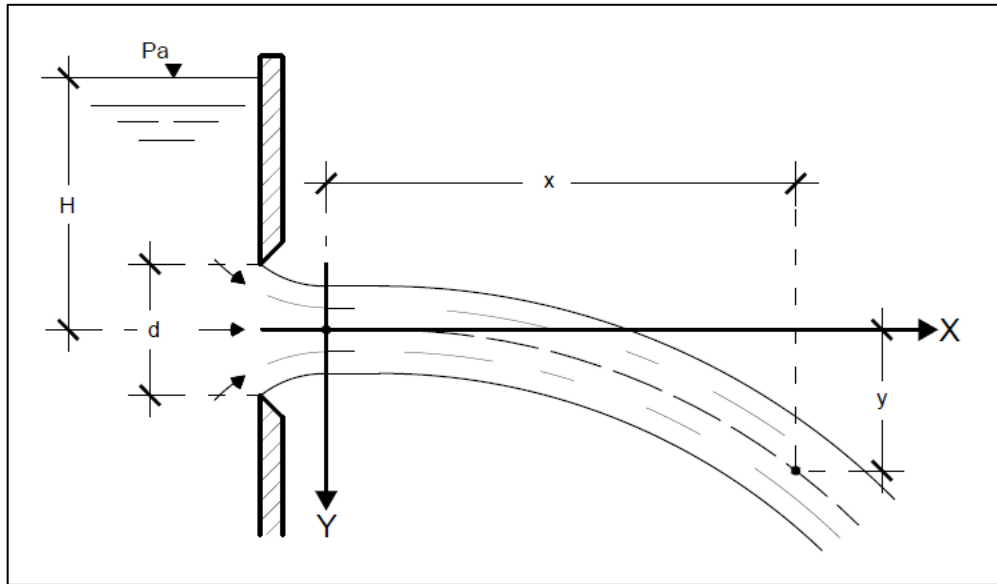


Fuente: elaboración propia.

1.1.2.4. **Orificios de pared delgada**

Son los orificios que poseen bisel en la superficie interna de la pared, la única área de contacto con el flujo del líquido. Esto permite que el flujo del líquido sufra gradualmente una contracción para formar un flujo de sección transversal menor a la del orificio.

Figura 6. Orificio de pared delgada

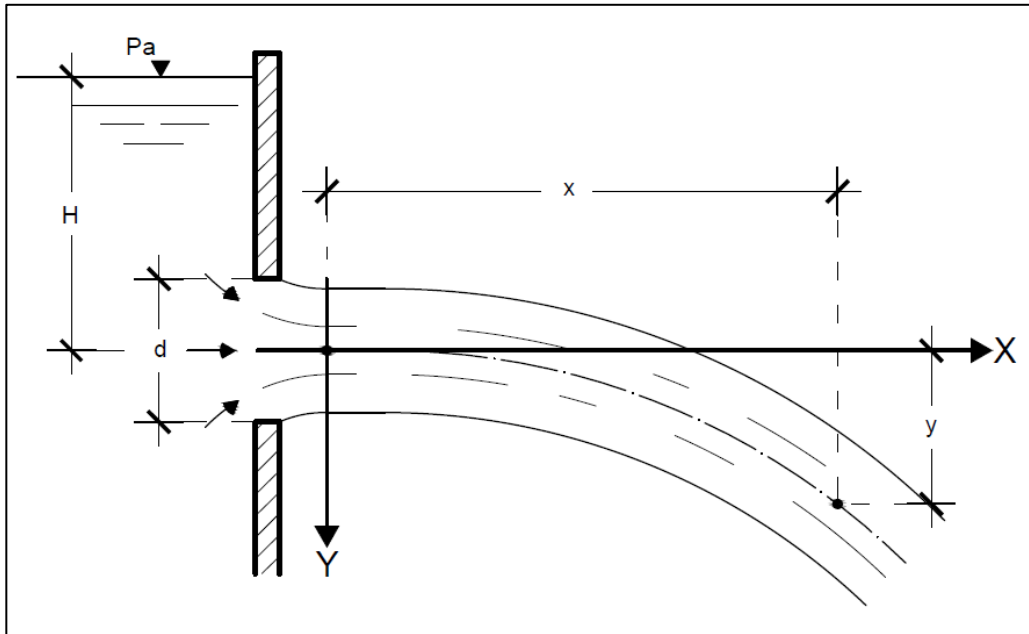


Fuente: elaboración propia.

1.1.2.5. Orificios de pared gruesa

Para esta clasificación se muestra adherencia del flujo líquido a la pared del orificio. El espesor de la pared del orificio no posee bisel y la sección transversal del flujo oscila, relativamente al diámetro del orificio (d), entre $1,5d$ y $2d$.

Figura 7. Orificio de pared gruesa



Fuente: elaboración propia.

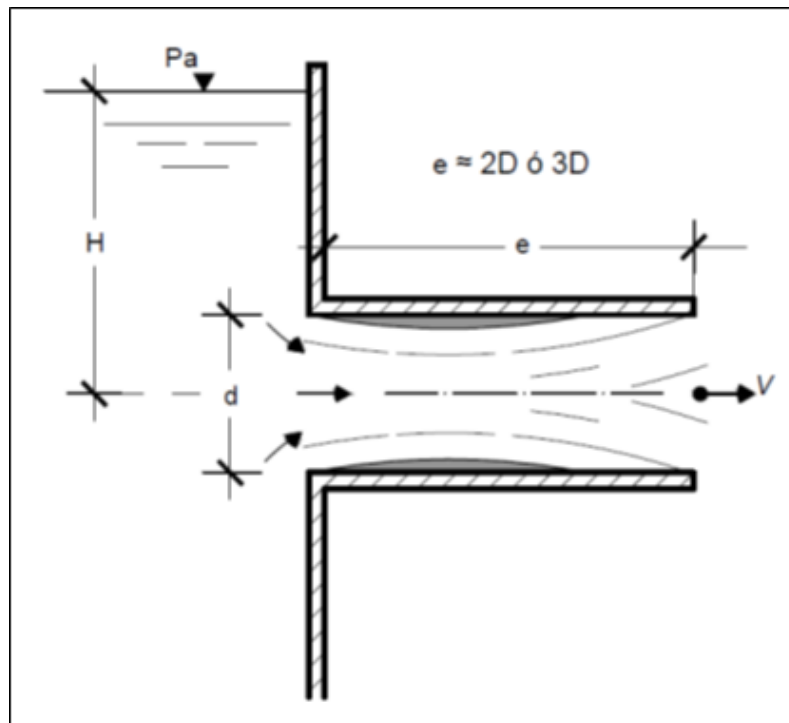
1.1.2.6. Orificios de tubos cortos

Al adaptarse al orificio un tubo corto, de longitud entre 2 o 3 veces el diámetro del orificio, estos dispositivos reciben el nombre de boquillas cilíndricas o boquillas patrón.

Este tubo puede estar en la superficie interna (o de borda) o externa de la pared, que no permite el flujo del líquido a la superficie libre de inmediato, sino al tubo. Su comportamiento es similar al de un orificio de pared gruesa. La contracción de la vena líquida ocurre en el interior de la boquilla cilíndrica.

En estos tubos la vena puede pegarse o no a sus paredes, cerrándolo por completo hasta llenarlo, dando como resultado un chorro que ocupa toda la sección de salida.

Figura 8. **Orificios de tubos cortos**

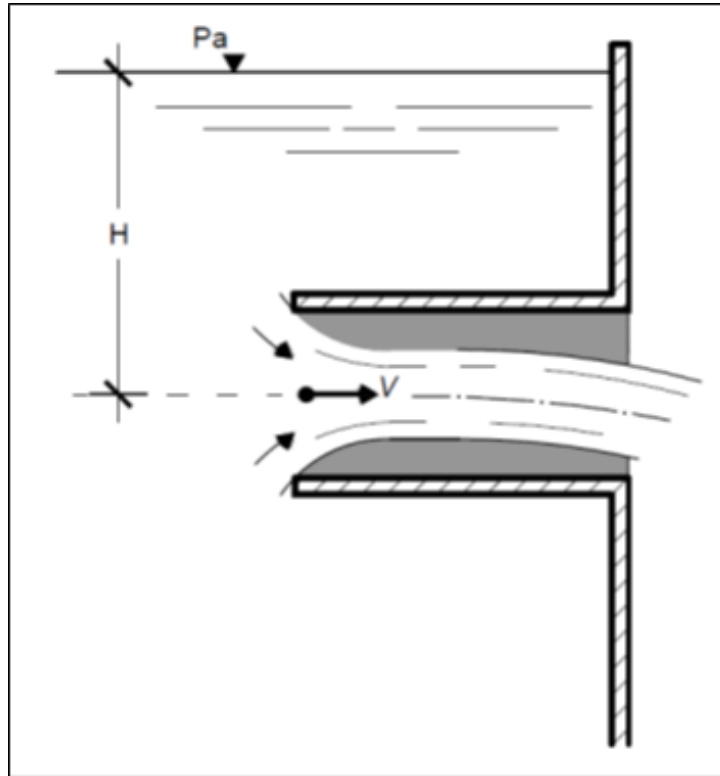


Fuente: elaboración propia.

1.1.2.7. **Boquillas cilíndricas de borda**

En estas boquillas la contracción de la sección transversal del flujo ocurre en el interior del tubo o inicio y no necesariamente el chorro se adhiere a las paredes.

Figura 9. **Boquilla cilíndrica de borda**

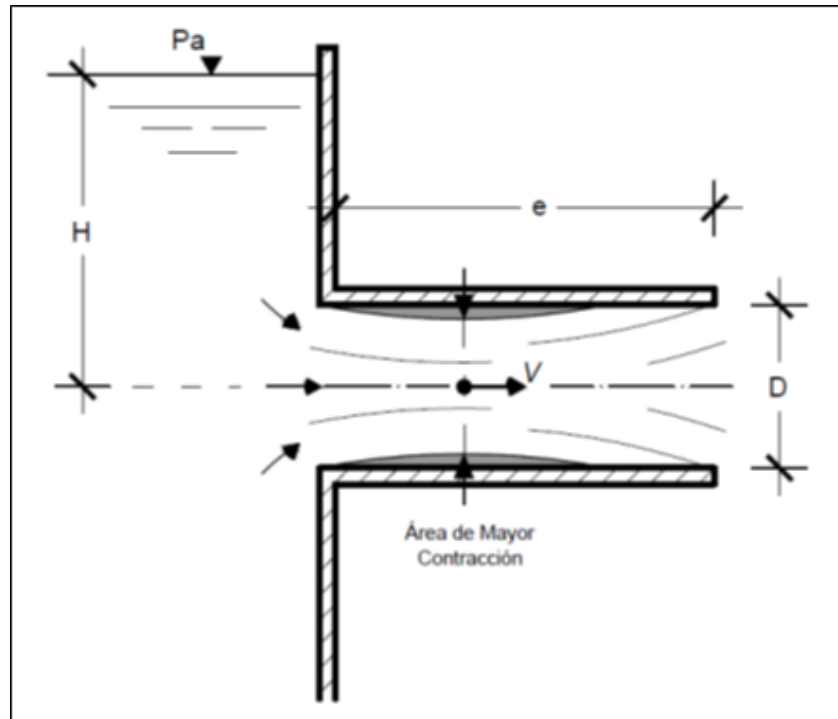


Fuente: elaboración propia.

1.1.2.8. **Boquillas cilíndricas externas**

Estas boquillas provocan que la sección transversal del flujo, después de mostrar contracción en la vena líquida, sea seguida de una expansión que provoca que el fluido drene a la superficie libre con el diámetro del cilindro.

Figura 10. **Boquilla cilíndrica externa**



Fuente: elaboración propia.

1.1.2.9. **Tubos o boquillas cónicas**

Estas adaptaciones de boquillas cónicas a los almacenamientos aumenta el caudal al drenar el fluido del almacenamiento.

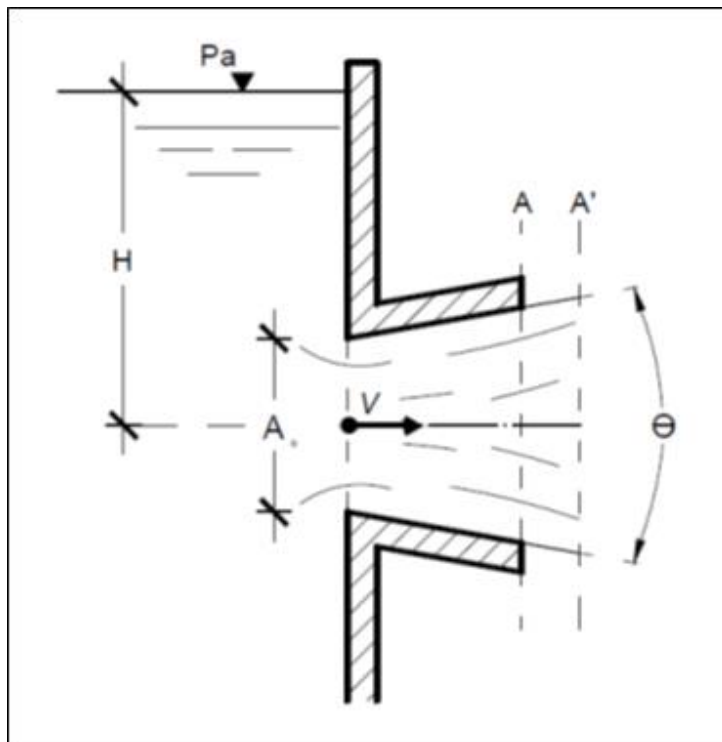
1.1.2.10. **Tubos cónicos divergentes**

Se adapta al orificio boquillas en forma cónica que converge al inicio de la sección transversal.

Estos dispositivos son llamados Vénturi, puesto que fueron estudiadas por este investigador, que demostró experimentalmente que un ángulo de divergencia de 5 grados y su espesor es igual a 9 veces el diámetro inicial, lo cual permite los más altos coeficientes de descarga.

Las boquillas divergentes con la pequeña sección inicial convergente, conforme muestra la figura, se denominan Venturi, por haber sido estudiados por este investigador italiano. Las experiencias de Venturi demuestran que un ángulo de divergencia de 5° , combinado con la longitud del tubo igual a cerca de nueve veces el diámetro de la sección estrangulada, permite los más altos coeficientes de descarga.

Figura 11. **Tubo cónico divergente**



Fuente: elaboración propia.

1.1.2.11. Tubos cónicos convergentes

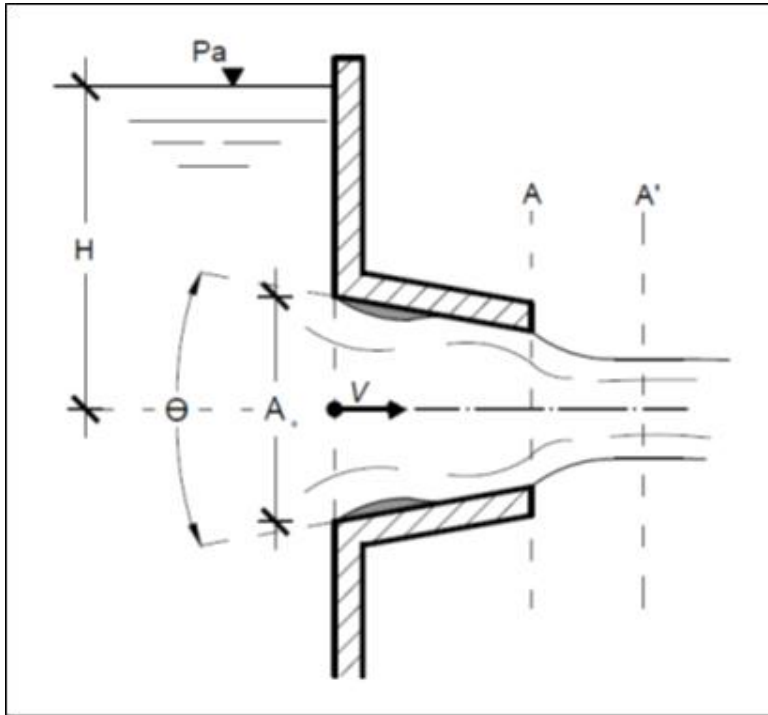
En la salida del depósito al tubo ocurre una contracción de la vena fluida, existe un aumento consiguiente de velocidad, y el chorro de fluido sale paralelo por el borde exterior.

Pero si dicho ángulo pasa de 12° , la convergencia del chorro contiguo a las paredes del tubo ocasiona una contracción exterior en la vena, y pasando de 20° , que es aproximadamente el ángulo de la vena contraída en el caso de las paredes delgadas, la contracción desaparece y se recae en las mismas circunstancias que si no existiese tubo adicional y las paredes del depósito presentasen su concavidad al interior.

Pero si el ángulo de convergencia excede de 20° , el problema del gasto y demás circunstancias del movimiento se haya comprendido de la misma manera que para el caso de paredes delgadas.

Más debajo de este límite el flujo es afectado no sólo por esta contracción, sino también por la alteración que experimenta la velocidad; pero siendo menor de 12° , la contracción exterior apenas es sensible y el gasto solo es afectado de la alteración que en la velocidad ocasiona la contracción interior.

Figura 12. **Tubo cónico convergente**



Fuente: elaboración propia.

2. PRINCIPIOS HIDRÁULICOS EN ORIFICIOS CIRCULARES DE PARED DELGADA

2.1. Orificios circulares de pared delgada

Geométricamente estos orificios poseen la forma de una circunferencia cerrada, estos orificios pueden ser biselados en la superficie interna de la pared o que la pared tenga un espesor no mayor de 5 centímetros. Permitiendo una contracción gradual del líquido para formar un flujo de sección transversal menor a la del orificio.

2.1.1. Funcionamiento hidráulico

En la figura 2 se muestra un tanque lleno de agua, para efectos del mismo, en una de las paredes laterales se ha perforado un orificio pequeño con diámetro (d) y espesor (s) que proporcionará facilidad de ciertos análisis.

La premisa básica para el modelo es que mantiene constante el volumen de fluido en el tanque de almacenamiento (puede satisfacerse al gozar de un caudal de entrada igual al caudal de salida, o bien, posee un caudal mayor al caudal de salida pero disponiendo de un sistema de rebalse), descargando a través del orificio un caudal teórico (Q_T).

El Q_T puede ser determinado con la aplicación de la ecuación de Bernoulli, entre la superficie libre de fluido del tanque (sección 1 de la figura 2) y la sección transversal del flujo con mayor contracción aguas abajo del orificio (sección 2, figura 2).

2.1.2. Ecuaciones de cálculo del caudal

Para definir la ecuación del sistema modelado y determinar el valor del Q_T , se debe previamente conocer las mediciones de d y s del orificio perforado.

De acuerdo al modelo en figura 2 se puede establecer trabajar con un orificio de pared delgada, ya que en la superficie interna de la pared cuenta con un bisel, el único punto de contacto entre el fluido y las aristas del orificio.

La inercia provoca que, mientras más próximo el fluido se encuentre del orificio, el fluido tiende a la dirección del centroide del orificio. Este cambio radical de dirección provoca la contracción de la sección transversal del flujo después de atravesar el orificio de pared delgada (sección 2, figura 2). La sección transversal aguas abajo del orificio recibe el nombre de sección contraída (A_c), la cual es menor al área del orificio de pared delgada (A).

Al plantear la ecuación de Bernoulli en el modelo, estableciendo como nivel de referencia la línea horizontal que pasa por el centro de gravedad de la sección 2, figura 2; aludiendo que en ambas secciones el valor de la presión atmosférica es el mismo, así como el peso específico del fluido; se considera lo siguiente:

En la sección 1, superficie libre de fluido del tanque:

- Topográficamente, respecto al nivel de referencia, la energía potencial es igual a $Z_1 = y$.

El valor de la energía de presión es determinada por la presión atmosférica sobre el peso específico del fluido ($\frac{P_A}{\gamma}$).

- Ya que el área transversal de la sección 1 es relativamente grande a la sección 2, figura 2, la velocidad media es casi nula, siendo el valor de la energía cinética igual a cero en esta sección ($\frac{V_1^2}{2g} = 0$).
- No se cuenta con ninguna pérdida o adición de energía al sistema.

En la sección 2, figura 2, la sección transversal de máxima contracción:

- Topográficamente, se encuentra en el nivel de referencia del modelo, por consiguiente, la energía potencial es igual a $Z_2 = 0$.
- El valor de la energía de presión es determinada por la presión atmosférica sobre el peso específico del fluido ($\frac{P_A}{\gamma}$).
- La velocidad es uniforme; la expresión de energía cinética es $\frac{V_2^2}{2g}$.
- No se cuenta con ninguna pérdida (h_f) o adición (h_b) de energía al sistema.
- Al igualar las anteriores sumatorias de energía potencial, energía de presión y energía cinética, de ambos sistemas se obtiene la expresión:

$$Z_1 + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - h_f - h_b = Z_2 + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 1})$$

Con la expresión obtenida, después de la aplicación del principio de Bernoulli en ambas secciones, se puede despejar la velocidad media teórica o ideal (sin rozamiento) en la sección 2, figura 2:

$$V_2 = \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 2})$$

Al despejar la velocidad media teórica en la sección 2, figura 2, se confirma el teorema de Torricelli:

$$V_t = C_v \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 3})$$

El caudal que fluye por el orificio será igual a la sección transversal de la vena contraída multiplicada por la velocidad en esa sección. La sección A_c de la vena contraída será:

$$A_c = C_c A \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde

- C_c es el coeficiente de contracción
- A es el área del orificio

El teorema de Torricelli demuestra el comportamiento parabólico de la velocidad media teórica o ideal (sin rozamiento) de un flujo de acuerdo a la energía potencial (Y) en un sistema de almacenamiento, que atraviesa un orificio de pared delgada por la acción de la gravedad (g), que asevera:

- La velocidad media es la velocidad óptima del caudal real (Q_r) en la sección contraída (A_c).
- El coeficiente, de velocidad (C_v) en un orificio de pared delgada tiene un valor de 1.

$$v_t = \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 5})$$

Por consiguiente se expresa el caudal real como:

$$Q_r = A_c \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 6})$$

2.1.3. Coeficiente de contracción

El coeficiente de contracción (C_c) es la relación entre la sección contraída (A_c) y la sección transversal del orificio de pared delgada a través del cual fluye el fluido (A_o).

$$C_c = \frac{A_c}{A_o} \quad (\text{Ec. 7})$$

2.1.4. Coeficiente de velocidad

El coeficiente de velocidad (C_v) es la relación entre la velocidad media real (∇_r) en la sección transversal aguas abajo del orificio y la velocidad media teórica o ideal (∇_t), es decir, sin rozamiento, teniendo este tendencia a valer 1.

$$C_v = \frac{\nabla_r}{\nabla_t} \approx 1 \quad (\text{Ec. 8})$$

Si:

$$\nabla_t = \sqrt{2gy}$$

Entonces:

$$C_v = \frac{\nabla_r}{\sqrt{2gY}} \quad (\text{Ec. 9})$$

El caudal real (Q_r) que fluye en la sección transversal aguas abajo del orificio será igual a la velocidad en la sección contraída (∇_r) por el área correspondiente a la sección contraída (A_c), es decir:

$$Q_r = V_r A_c \quad (\text{Ec. 10})$$

2.1.5. Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga (C_d) es la relación entre el caudal real (Q_r), determinado por el aforo volumétrico y el caudal teórico (Q_t), definido por el área del orificio (A_o) y la velocidad teórica (V_t).

$$Q_t = A_o \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$Q_t = A_o \cdot V_t \quad (\text{Ec. 12})$$

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (\text{Ec. 13})$$

Es elemental visualizar, de acuerdo a las ecuaciones anteriormente descritas, el coeficiente de descarga (C_d) es, también, el producto del coeficiente de velocidad (C_v) con coeficiente de contracción (C_c).

$$C_d = C_v \cdot C_c \quad (\text{Ec. 14})$$

Es importante mencionar que para un orificio de pared delgada el coeficiente de descarga (C_d) no es constante. Para cualquier sistema, varía con el número de Reynolds, como lo muestra la figura 13.

Finalmente, se obtiene la ecuación general de flujo por orificios:

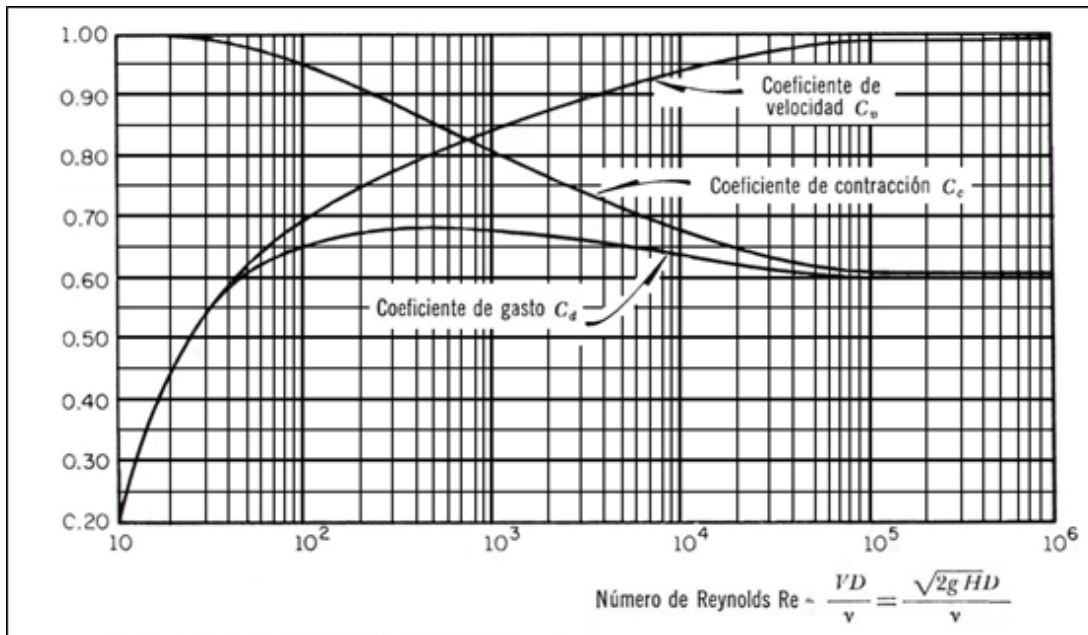
$$Q_r = C_d A_o \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde

- C_d : es el coeficiente de descarga
- y : es el área del orificio

$$Q_r = C_d \cdot Q_t \quad (\text{Ec. 16})$$

Figura 13. **Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds**

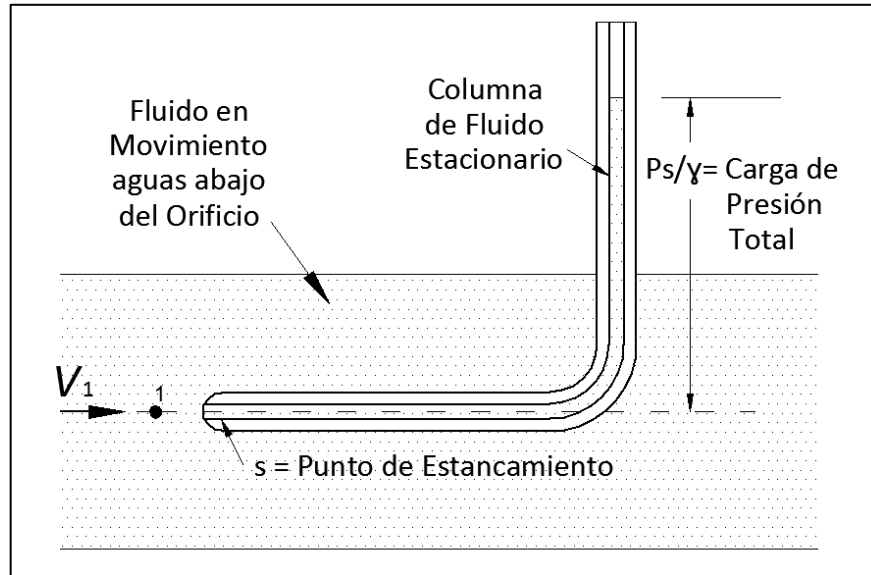


Fuente: RODRIGUEZ DÍAZ, Hector Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 112.

2.1.6. Cálculo de la velocidad real

Para determinar el valor de la velocidad real del flujo a través de los orificios se consideró la implementación del tubo de Pitot que indica el valor de la velocidad en cierto punto de la corriente; su principio hidráulico de funcionamiento se basa en que cuando un fluido en movimiento es obligado a detenerse al topar con un objeto estacionario, se crea una presión que es mayor que la presión de la corriente del fluido. La magnitud de este aumento de la presión está relacionada con la velocidad del fluido en movimiento. El tubo Pitot utiliza este principio para indicar la velocidad, como se muestra en la figura 14.

Figura 14. **Tubo Pitot**



Fuente: elaboración propia.

El tubo Pitot es un tubo hueco puesto de modo que el extremo abierto apunte directamente hacia la corriente del fluido; entonces, el fluido que está en la embocadura o muy cerca de esta, pero dentro del tubo, se estaciona o estanca, este punto se conoce como punto de estancamiento (s).

Se puede utilizar la ecuación de la energía para relacionar la presión existente en el punto de estancamiento con la velocidad del fluido. Si el punto 1 se encuentra en la corriente no perturbada que está por delante del tubo Pitot, entonces:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_s}{\gamma} + z_s + \frac{v_s^2}{2g}$$

Obsérvese que $v_s = 0$, $z_1 = z_2$ o casi, y $h_L = 0$, o casi. Entonces,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\gamma} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde

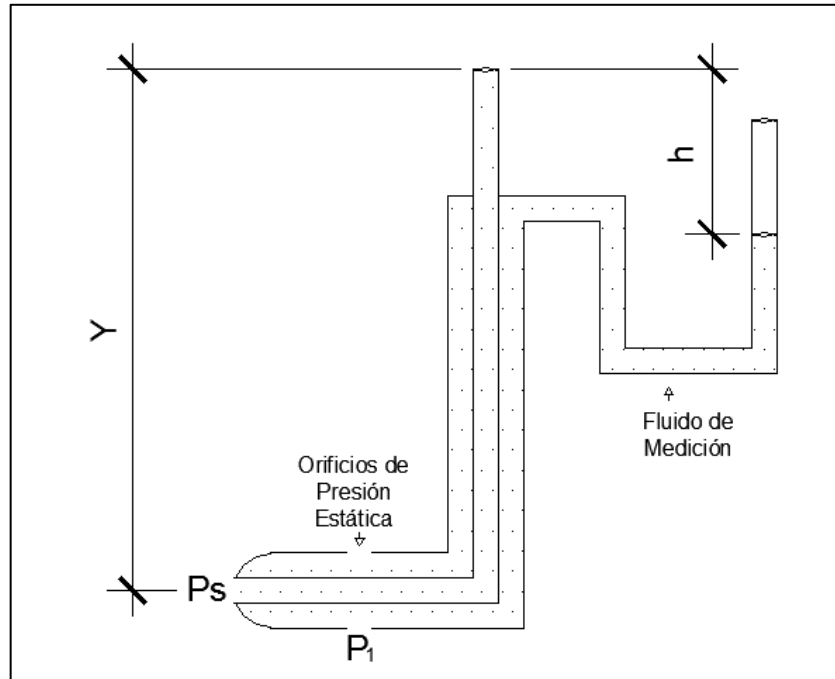
- P_1 = presión estática en la corriente principal del fluido
- $\frac{P_1}{\gamma}$ = carga de presión estática
- P_s = presión de estancamiento o presión total
- $\frac{P_s}{\gamma}$ = carga de presión total
- $\frac{v_1^2}{2g}$ = carga de presión de la velocidad

La carga de presión total es igual a la suma de la carga de presión estática y la carga de presión de la velocidad. Al resolver la ecuación para la velocidad, se obtiene:

$$v_1 = \sqrt{2g(P_s - P_1)/\gamma} \quad (\text{Ec. 18})$$

Se observa que solo se requiere la diferencia entre P_s y P_1 para calcular la velocidad. Cuando el tubo se a línea con la dirección del flujo, el orificio radial es perpendicular al flujo y, por lo tanto, detecta la presión estática local, denominada como P_1 . Observe que una toma de presión estática se fija en el extremo del tubo para permitir su conexión a un instrumento de medición.

Figura 15. **Montaje del tubo de Pitot utilizado en el ensayo**



Fuente: elaboración propia.

Si se utiliza un tubo de Pitot, como se muestra en la figura 15, la deflexión h del manómetro se puede relacionar directamente con la velocidad. Es posible escribir la ecuación que describe la diferencia entre P_s y P_1 comenzando por los orificios de presión estática en el lado del tubo, proceder luego a través del manómetro y terminar en el extremo abierto del tubo en el punto s:

$$P_1 - \gamma(y - h) = P_s - \gamma y \quad (\text{Ec. 19})$$

$$P_1 - \gamma y + \gamma h = P_s - \gamma y \quad (\text{Ec. 20})$$

Entonces, al resolver para la diferencia de presión y sustituirlo en la ecuación (17) resulta:

$$v_1 = \sqrt{2g(P_s - P_1)/\gamma} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (\text{Ec. 22})$$

La velocidad calculada mediante la ecuación 18 o la ecuación 21 es la velocidad local registrada en la ubicación particular de la embocadura del tubo.

3. ENSAYO DE ORIFICIOS CON DESCARGA LIBRE

3.1. Criterios para el dimensionamiento de los diámetros del orificio

El ensayo consiste inicialmente en seleccionar el diámetro de los diez orificios con los cuales se trabajarían en los ensayos de análisis. El orificio mínimo a utilizar es de tres centímetros de diámetro; el siguiente es un centímetro mayor al anterior hasta obtener un orificio de quince centímetros de diámetro aproximadamente.

3.2. Material de construcción

El material de la placa de pared delgada del orificio debe ser de un material capaz de soportar el efecto de corte que provoca el flujo de agua en el área de contacto, y contrarrestar el efecto de pandeo en la misma y la modificación de la geometría del orificio, esta placa debe estar biselada para cumplir con que sean mediciones en pared delgada (ver figura 17).

Debido a los requerimientos se propone una pared de acero galvanizado. La placa principal posee 58 centímetros de altura, 31 centímetros de ancho, 0,318 de centímetro de espesor y una perforación circular de 15 centímetros de diámetro la distancia del borde inferior del orificio hacia la base de la placa es de 7,5 centímetros.

En esta primera placa se adaptan individualmente, 9 placas más de 20 centímetros de alto, 20 centímetros de ancho y 0,318 de centímetro de espesor, y cuenta con perforaciones circulares desde 3 centímetros de diámetro hasta 13 centímetros de diámetros, la distancia del borde inferior del orificio hacia la

parte más baja de la placa es de 8,5 centímetros, de esta manera se pretende conseguir el mayor número de variantes en la carga.

Figura 16. Foto de una placa metálica

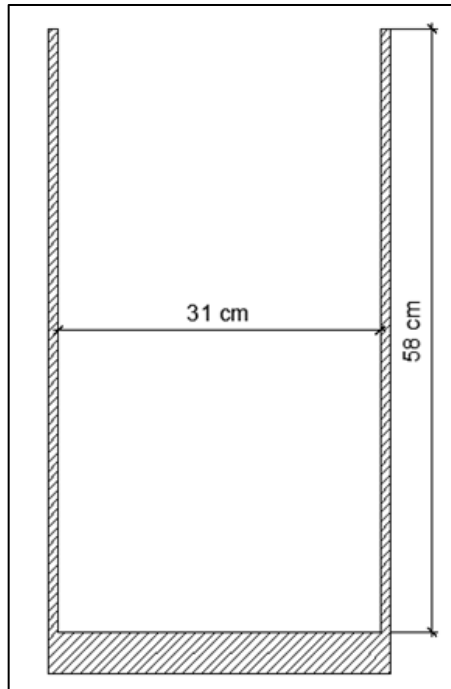


Fuente: elaboración propia.

3.3. Límites de aplicación

Para esta aplicación la limitante es la geometría de las instalaciones del canal con que cuenta el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala ya que se cuenta con un canal de ancho de 31 centímetros, y con una altura máxima de 58 centímetros (ver figura 16), para controlar el flujo en el tanque contenedor del aforo.

Figura 17. **Área del canal del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

Se considera una carga mínima, para la toma de caudales, la mitad del diámetro del orificio puesto en ensayo, con una carga menor al mencionado el flujo en el orificio resulta sumergido o inaceptable por no llenar la sección total del orificio.

La condición máxima en la toma de caudales para todos los orificios es de una carga de 57 centímetros, carga que fue considerada por la geometría del canal.

3.4. Procedimiento experimental

Los elementos que conforman el equipo adecuado para el desarrollo del ensayo son los siguientes:

- Tanque con sistema de alimentación por bomba que succiona el volumen de agua, este es metálico y de sección transversal constante (ver figura 18).

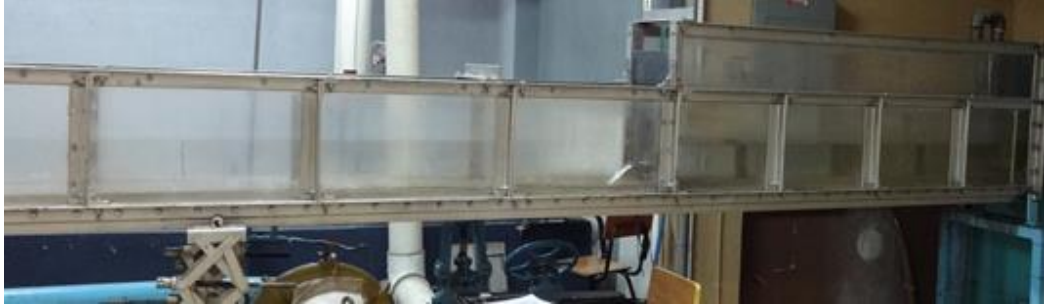
Figura 18. **Tanque metálico de succión por bomba**



Fuente: elaboración propia.

Canal con paredes de acrílico que permite la visibilidad y piso de lámina metálica, cuyas sección transversal es constante (ver figura 19).

Figura 19. **Canal con paredes de acrílico**



Fuente: elaboración propia.

- Tanque volumétrico para el aforo de caudales, con piezómetro exterior para medir volumen (ver figura 20).

Figura 20. **Tanque volumétrico**



Fuente: elaboración propia.

- Cronómetro para medir el tiempo de llenado en el tanque volumétrico con el piezómetro (ver figura 21).

Figura 21. **Cronómetro digital**



Fuente: elaboración propia.

- Tabla de toma de datos (tabla I)

Tabla I. **Tabla de toma de datos**

*Número de orificio:
Diámetro del orificio:*

Núm.	H (cm)	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1		Aforo 2		Aforo 3	
				t (s)	h (cm)	t (s)	h (cm)	t (s)	h (cm)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Fuente: elaboración propia.

3.5. Ensayo de orificios circulares

- Determinar el diámetro del orificio ensayado con la ayuda de un vernier (ver figura 22).

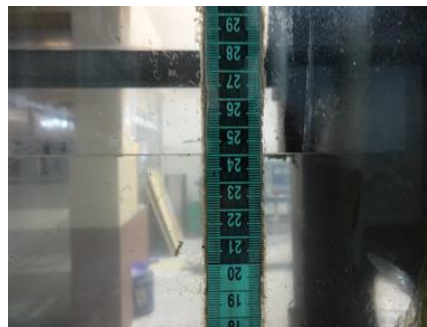
Figura 22. **Medición de diámetro del orificio**



Fuente: elaboración propia.

- Regular la carga antes del orificio, de manera que sea constante (ver figura 23).

Figura 23. **Carga regulada aguas arriba del orificio**



Fuente: elaboración propia.

- Ocasionar un flujo con descarga libre (ver figura 24)

Figura 24. **Descarga libre por orificio**



Fuente: elaboración propia.

- Medir el tiempo, en segundos, de llenado del tanque recolector utilizado para el aforo volumétrico, (figura 25).

Figura 25. **Aforo volumétrico**



Fuente: elaboración propia.

- Medir el diámetro de la sección contraída (ϕ_c), para determinar el área contraída (A_c) aguas abajo del orificio, (figura 26).

Figura 26. **Medición de diámetro en la sección contraída**



Fuente: elaboración propia.

- Utilizar tubo de Pitot para determinar la velocidad real en el área contraída (ver figura 27).

Figura 27. **Implementación de tubo de Pitot en ensayo de orificio de 3,10 cm**



Fuente: elaboración propia.

3.5.1. **Datos obtenidos**

El valor del caudal observado se obtiene a través de los datos resultantes del aforo volumétrico, para dicho aforo se utiliza el tanque aguas abajo del orificio ensayado. La ecuación 23, permite determinar el volumen de agua aforado en litros, por medio de la altura piezométrica (cm) instalada a un costado del tanque.

$$V = 0,0024h^2 + 6.8504h + 54.623 \quad (\text{Ec. 23})$$

Para el cálculo del caudal observado en las tres repeticiones se utiliza el valor del volumen del aforo en litros, y el tiempo de llenado en segundos (ecuación 24). Posteriormente, se calcula el promedio para cada carga del orificio ensayado con la ecuación 25.

$$Q_{\text{observado}} = V/t \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\text{Promedio } Q_{\text{observado}} = \frac{\sum Q_{\text{observado}}}{3} \quad (\text{Ec. 25})$$

Tabla II. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 9,56 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1		Aforo 2		Aforo 3	
				t	H	t	h	t	H
				(s)	(cm)	(s)	(cm)	(s)	(cm)
1	7,9	8,4	7,78	22,98	11,7	23,31	10,6	22,49	11,4
2	12,5	12,3	7,92	22,24	16,5	22,04	16,4	21,34	15,8
3	19,0	18,0	7,99	15,33	13,3	19,15	18,0	15,96	13,5
4	24,4	22,5	8,01	20,73	23,4	20,78	23,7	21,05	23,9
5	29,5	27,1	8,00	18,72	23,8	20,31	25,7	19,04	23,8
6	36,0	33,5	7,86	19,09	27,4	20,10	28,4	20,48	29,5
7	42,9	39,7	8,01	17,79	26,7	17,16	27,3	17,79	27,6

Fuente: elaboración propia.

Se muestra el ejemplo de la obtención del volumen para la tabla II, primera corrida y primera repetición para la séptima placa con orificio de diámetro de 9.56 cm con la ecuación 21, siendo el procedimiento el mismo para todos los datos del ensayo realizado.

Altura en el piezómetro (h) = 11,7 cm

$$\text{Volumen } (h = \text{cm}) = 0,0024(11,7 \text{ cm})^2 + 6,8504(11,7 \text{ cm}) + 54,623$$

$$\text{Volumen } (h = 11,7 \text{ cm}) = 135,10 \text{ litros}$$

Tabla III. **Tabla con volúmenes correspondientes a cada uno de los aforos practicados en orificio de 9,56 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	7,92	8,4	7,78	22,98	11,7	135,10	23,31	10,6	127,5	22,49	11,4	133,0
2	12,52	12,3	7,92	22,24	16,5	168,31	22,04	16,4	167,6	21,34	15,8	163,5
3	19,02	18,0	7,99	15,33	13,3	146,16	19,15	18,0	178,7	15,96	13,5	147,5
4	24,42	22,5	8,01	20,73	23,4	216,24	20,78	23,7	218,3	21,05	23,9	219,7
5	29,52	27,1	8,00	18,72	23,8	219,02	20,31	25,7	232,3	19,04	23,8	219,0
6	36,02	33,5	7,86	19,09	27,4	244,13	20,10	28,4	251,1	20,48	29,5	258,8
7	42,92	39,7	8,01	17,79	26,7	239,24	17,16	27,3	243,4	17,79	27,6	245,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 3,10 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	11,75	12,20	2,60	175,00	8,80	115,09	5,30	121,00	91,00	124,00	5,90	95,12
2	16,45	17,30	2,54	88,00	3,90	81,38	5,50	94,00	92,37	89,00	5,20	90,31
3	21,95	22,60	2,60	112,00	8,30	111,65	8,40	104,00	112,34	70,00	3,30	77,26
4	25,35	26,80	2,56	64,00	4,90	88,25	2,60	56,00	72,45	65,00	4,10	82,75
5	32,45	33,30	2,55	53,00	2,90	74,51	5,10	68,00	89,62	59,00	4,00	82,06
6	33,65	34,60	2,56	88,00	10,60	127,51	3,90	56,00	81,38	49,00	2,60	72,45
7	37,45	38,40	2,58	54,00	3,90	81,38	4,30	57,00	84,12	53,00	4,00	82,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 5,10 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	h	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	L
1	3,65	5,80	4,24	62,00	4,50	85,50	3,70	61,00	80,00	62,00	3,90	81,38
2	6,35	8,10	4,25	62,00	7,40	105,45	10,20	73,00	124,75	61,00	7,10	103,38
3	8,75	10,50	4,21	44,00	4,90	88,25	5,00	44,00	88,94	46,00	5,50	92,37
4	20,45	21,60	4,25	54,00	17,30	173,85	8,90	39,00	115,78	31,00	6,10	96,50
5	24,95	25,40	4,22	32,00	7,40	105,45	6,80	31,00	101,32	36,00	9,40	119,23
6	29,55	30,70	4,27	27,00	6,60	99,94	8,30	31,00	111,65	30,00	8,10	110,27
7	35,05	34,70	4,28	37,00	12,90	143,39	14,10	39,00	151,69	26,00	6,70	100,63

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 6,02 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	h	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	L
1	5,99	7,60	4,95	37,63	5,50	92,37	4,80	36,40	87,56	39,00	5,10	89,62
2	9,29	11,40	4,96	34,00	6,90	102,01	5,70	35,00	93,75	33,00	5,40	91,69
3	13,19	14,10	5,05	31,00	7,40	105,45	7,00	30,00	102,69	30,00	7,00	102,69
4	30,29	30,30	4,92	32,98	15,70	162,77	18,80	38,57	184,26	26,65	10,30	125,44
5	30,69	31,80	4,95	22,50	8,00	109,58	7,80	22,50	108,20	21,00	7,00	102,69
6	36,19	38,50	4,86	24,50	10,70	128,20	10,70	24,00	128,20	24,00	10,50	126,82
7	43,59	43,80	4,93	27,62	15,40	160,69	14,80	26,91	156,53	25,68	12,70	142,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 7,30 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	7,85	8,40	6,12	22,00	4,00	82,06	5,10	24,00	89,62	27,00	6,10	96,50
2	13,05	13,40	6,08	18,00	4,00	82,06	4,10	18,00	82,75	18,00	4,00	82,06
3	17,85	18,00	6,11	15,00	5,60	93,06	4,60	15,00	86,19	17,00	5,70	93,75
4	22,65	22,70	6,11	18,00	8,90	115,78	3,20	12,00	76,57	30,00	18,00	178,71
5	27,55	27,40	6,12	13,00	5,50	92,37	6,40	14,00	98,56	14,00	5,50	92,37
6	32,85	32,60	6,09	13,00	6,00	95,81	13,00	20,00	144,08	15,00	7,90	108,89
7	37,35	37,40	6,09	13,00	7,30	104,76	5,30	11,00	91,00	12,00	6,40	98,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 8,38 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	6,91	8,70	6,94	27,00	9,40	119,23	9,10	26,00	117,16	26,00	9,10	117,16
2	11,81	12,50	7,03	21,00	10,70	128,20	9,80	21,00	121,99	34,00	20,50	196,06
3	16,91	16,70	7,02	18,00	10,10	124,06	10,50	18,00	126,82	17,00	9,30	118,54
4	22,91	22,60	7,00	16,00	10,60	127,51	10,60	16,00	127,51	16,00	10,80	128,89
5	26,71	26,70	7,02	15,00	11,60	134,41	9,80	14,00	121,99	15,00	10,70	128,20
6	31,91	30,80	7,00	15,00	13,30	146,16	12,30	14,00	139,25	17,00	15,10	158,61
7	36,91	35,40	7,02	15,00	14,90	157,23	14,00	15,00	151,00	16,00	15,70	162,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 8,94 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	h	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	L
1	16,53	15,80	7,50	21,88	16,90	171,08	24,90	29,25	226,69	27,62	23,30	215,54
2	24,83	23,20	7,45	27,65	29,60	259,50	30,80	29,10	267,89	27,60	29,50	258,80
3	29,13	27,00	7,47	26,37	30,70	267,19	32,40	27,61	279,10	27,57	31,70	274,19
4	32,53	30,80	7,53	11,00	9,60	120,61	7,30	10,00	104,76	10,00	8,70	114,40
5	35,03	32,50	7,47	27,82	35,90	303,65	33,00	25,41	283,30	27,21	34,90	296,63
6	40,73	39,00	7,55	13,00	14,80	156,53	10,70	10,00	128,20	12,00	12,90	143,39
7	42,73	39,60	7,53	26,90	40,30	334,59	33,50	23,60	286,80	20,97	29,20	256,70

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 11,78 cm de diámetro**

No.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φ_c (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	h	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	L
1	12,01	11,30	9,92	16,80	20,00	192,59	19,90	16,93	191,90	17,92	22,20	207,88
2	16,91	15,80	9,82	18,80	28,40	251,11	27,50	18,45	244,82	18,14	27,30	243,43
3	23,21	20,60	9,87	18,42	33,90	289,61	33,80	18,50	288,91	17,89	32,70	281,20
4	27,91	24,30	9,89	18,18	36,80	309,97	32,60	16,41	280,50	18,02	36,10	305,05
5	33,41	29,10	9,87	18,93	43,00	353,63	40,90	18,30	338,82	21,34	48,60	393,22
6	39,31	34,10	9,88	21,04	52,40	420,17	47,30	19,20	384,02	17,11	41,50	343,05
7	19,61	17,10	9,95	24,15	41,70	344,46	41,00	23,58	339,52	24,27	42,10	347,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 13,33 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φc (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	11,24	10,10	11,72	17,69	28,00	248,32	28,70	17,82	253,21	17,22	27,90	247,62
2	15,84	13,40	11,54	20,38	41,10	340,23	36,40	17,98	307,16	17,63	35,70	302,24
3	21,94	18,60	11,65	21,39	52,40	420,17	56,70	23,22	450,76	17,02	42,30	348,69
4	26,04	21,20	11,63	17,82	48,00	388,97	45,90	17,36	374,11	17,06	45,40	370,58
5	31,04	27,00	11,65	13,72	38,60	322,62	44,50	15,58	364,22	16,17	46,80	380,48
6	35,54	28,90	11,64	16,42	51,10	410,95	51,80	16,57	415,91	17,72	55,00	438,66
7	39,54	33,10	11,57	17,22	56,30	447,91	56,00	17,15	445,77	17,28	55,90	445,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Tabla de datos obtenidos en orificio de 15,06 cm de diámetro**

Núm	Carga (y) en cm	Δh (cm) Tubo de Pitot	Φc (cm)	Aforo 1			Aforo 2			Aforo 3		
				t	h	Vol	t	h	Vol	t	H	Vol
				(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l	(s)	(cm)	l
1	11,27	10,20	12,77	18,60	39,30	327,55	42,40	20,10	349,39	19,59	41,00	339,52
2	15,77	13,50	12,74	22,34	56,90	452,18	43,40	17,32	356,45	18,26	46,10	375,53
3	22,57	19,00	12,80	16,83	51,30	412,36	50,90	16,94	409,53	16,81	50,70	408,11
4	26,57	22,40	12,95	15,59	50,50	406,69	52,80	16,11	423,01	15,93	52,70	422,30
5	31,27	26,70	12,64	15,43	55,10	439,37	58,50	16,52	463,58	15,94	57,30	455,03
6	35,27	29,80	12,76	12,60	48,10	389,68	47,90	12,62	388,26	12,60	47,60	386,14
7	40,07	33,00	12,75	12,56	50,10	403,85	50,70	12,59	408,11	13,80	55,30	440,79

Fuente: elaboración propia

Se muestra el ejemplo de la obtención del caudal observado para la primera corrida de la tabla II:

$$Q_{obs} = \frac{[Qr1 + Qr2 + Qr3]}{3}$$

Donde:

Q_{obs} = caudal observado real

$$Q_{obs} = \frac{\left[\frac{Vol\ 1}{t\ 1} + \frac{Vol\ 2}{t\ 2} + \frac{Vol\ 3}{t\ 3} \right]}{3}$$

$$\langle Q_{obs} \rangle = \frac{\left[\frac{135,1\ l}{22,98\ s} + \frac{127,5\ l}{23,31\ s} + \frac{133,0\ l}{22,49\ s} \right]}{3} = 5,75\ l/s$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Tabla XIII. **Caudales observados en orificio de 9,56 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	7,92	5,88	5,47	5,92	5,75
2	12,52	7,57	7,61	7,66	7,61
3	19,02	9,53	9,33	9,24	9,37
4	24,42	10,43	10,51	10,44	10,46
5	29,52	11,70	11,44	11,50	11,55
6	36,02	12,79	12,49	12,64	12,64
7	42,92	13,45	14,19	13,80	13,81

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Caudales observados en orificio de 3,10 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	11,75	0,66	0,75	0,77	0,73

Continuación de la tabla XIV.

2	16,45	0,92	0,98	1,01	0,97
3	21,95	1,00	1,08	1,10	1,06
4	25,35	1,38	1,29	1,27	1,32
5	32,45	1,41	1,32	1,39	1,37
6	33,65	1,45	1,45	1,48	1,46
7	37,45	1,51	1,48	1,55	1,51

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Caudales observados en orificio de 5,10 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	3,65	1,38	1,31	1,31	1,33
2	6,35	1,70	1,71	1,69	1,70
3	8,75	2,01	2,02	2,01	2,01
4	20,45	3,22	2,97	3,11	3,10
5	24,95	3,30	3,27	3,31	3,29
6	29,55	3,70	3,60	3,68	3,66
7	35,05	3,88	3,89	3,87	3,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Caudales observados en orificio de 6,02 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	5,99	2,45	2,41	2,30	2,39
2	9,29	3,00	2,68	2,78	2,82
3	13,19	3,40	3,42	3,42	3,42
4	30,29	4,94	4,78	4,71	4,81
5	30,69	4,87	4,81	4,89	4,86
6	36,19	5,23	5,34	5,28	5,29
7	43,59	5,82	5,82	5,53	5,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Caudales observados en orificio de 7,30 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	7,85	3,73	3,73	3,57	3,68
2	13,05	4,56	4,60	4,56	4,57
3	17,85	6,20	5,75	5,51	5,82
4	22,65	6,43	6,38	5,96	6,26
5	27,55	7,11	7,04	6,60	6,91
6	32,85	7,37	7,20	7,26	7,28
7	37,35	8,06	8,27	8,21	8,18

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Caudales observados en orificio de 8,38 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	6,91	4,42	4,51	4,51	4,48
2	11,81	6,10	5,81	5,77	5,89
3	16,91	6,89	7,05	6,97	6,97
4	22,91	7,97	7,97	8,06	8,00
5	26,71	8,96	8,71	8,55	8,74
6	31,91	9,74	9,95	9,33	9,67
7	36,91	10,48	10,07	10,17	10,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Caudales observados en orificio de 8,94 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	16,53	7,82	7,75	7,80	7,79
2	24,83	9,39	9,21	9,38	9,32

Continuación de la tabla XIX.

3	29,13	10,13	10,11	9,95	10,06
4	32,53	10,96	10,48	11,44	10,96
5	35,03	10,91	11,15	10,90	10,99
6	40,73	12,04	12,82	11,95	12,27
7	42,73	12,44	12,15	12,24	12,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Caudales observados en orificio de 11,78 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	12,01	11,46	11,33	11,60	11,47
2	16,91	13,36	13,27	13,42	13,35
3	23,21	15,72	15,62	15,72	15,69
4	27,91	17,05	17,09	16,93	17,02
5	33,41	18,68	18,51	18,43	18,54
6	39,31	19,97	20,00	20,05	20,01
7	19,61	14,26	14,40	14,31	14,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Caudales observados en orificio de 13,33 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	11,24	14,04	14,21	14,38	14,21
2	15,84	16,69	17,08	17,14	16,97
3	21,94	19,64	19,41	20,49	19,85
4	26,04	21,83	21,55	21,72	21,70
5	31,04	23,51	23,38	23,53	23,47
6	35,54	25,03	25,10	24,75	24,96
7	39,54	26,01	25,99	25,76	25,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Caudales observados en orificio de 15,06 cm de diámetro**

Núm.	Carga (y) (cm)	Aforo 1	Aforo 2	Aforo 3	PROMEDIO
		Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q Observado (l/s)
1	11,27	17,61	17,38	17,33	17,44
2	15,77	20,24	20,58	20,57	20,46
3	22,57	24,50	24,18	24,28	24,32
4	26,57	26,09	26,26	26,51	26,28
5	31,27	28,47	28,06	28,55	28,36
6	35,27	30,93	30,77	30,65	30,78
7	40,07	32,15	32,42	31,94	32,17

Fuente: elaboración propia.

Para el valor del área de la sección contraída se operaron los valores del diámetro contraído para la primera corrida de la tabla II, tomados con el vernier en los ensayos, con la ecuación 26:

$$A_c = \frac{(\Phi_c)^2 \pi}{4} \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

- A_c = área de la sección contraída
- Φ_c = diámetro de la sección contraída

$$A_c = \frac{(7,78 \text{ cm})^2 \pi}{4}$$

$$A_c = 47,5389 \text{ cm}^2$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Para determinar el valor del coeficiente de contracción se implementó la ecuación 7, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II.

$$C_c = \frac{A_c}{A_o}$$

Donde:

- C_c = coeficiente de contracción.
- A_c = área de la sección contraída.
- A_o = área de la sección transversal del orificio de pared delgada a través del cual fluye el fluido; para este orificio el valor es de 71,7804 cm².

$$C_c = \frac{47,5389 \text{ cm}^2}{71.7804 \text{ cm}^2}$$

$$C_c = 0,662$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Para el cálculo de la velocidad teórica se utilizó la ecuación 2, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II.

$$V_2 = \sqrt{2gy}$$

Donde:

- V_2 = velocidad teórica en el área de la sección contraída
- y = Carga aguas arriba del orificio de pared delgada

$$V_2 = \sqrt{2 * \left(981 \frac{cm}{s^2}\right) * (7,92 cm)}$$

$$V_2 = 124,656 cm/s$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Para el cálculo de la velocidad real se utilizó la ecuación 21, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II.

$$V_r = \sqrt{2gh}$$

Donde:

- V_r = velocidad real en el área de la sección contraída (cm/s)
- h = altura entre el diferencial de presión en el tubo estático Pitot (cm)

$$V_r = \sqrt{2 * \left(981 \frac{cm}{s^2}\right) * (8,40 cm)}$$

$$V_r = 128,378 cm/s$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

El valor del coeficiente de velocidad fue obtenido con la ecuación 8, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II.

$$C_v = \frac{V_r}{V_t}$$

Donde:

- C_v = coeficiente de velocidad
- ∇_r = velocidad real en el área de la sección contraída (cm/s)
- ∇_t = velocidad teórica en el área de la sección contraída (cm/s)

$$C_v = \frac{128,378 \text{ cm/s}}{124,656 \text{ cm/s}}$$

$$C_v = 1,0299 \approx 1$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

El valor del coeficiente de descarga fue obtenido con la ecuación 14, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II.

$$C_d = C_v \cdot C_c$$

Donde:

- C_d = coeficiente de descarga
- C_v = coeficiente de velocidad
- C_c = coeficiente de contracción

$$C_d = 0,662 \times 1,0299$$

$$C_d = 0,682$$

Para determinar el valor del caudal teórico se utiliza la ecuación 12, se ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la Tabla II.

$$Q_t = A_o \cdot V_t$$

Donde:

- Q_t = caudal teórico (l/s).
- A_o = área de la sección transversal del orificio de pared delgada (cm^2); para este orificio el valor es de $71,7804 cm^2$.
- V_t = velocidad teórica en el área de la sección contraída (cm/s).

$$Q_t = 71,7804 cm^2 \times 124,656 cm/s$$

$$Q_t = 8,948 l/s$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Con la ecuación general, ecuación 16, se determina el caudal de flujo por los orificios, ejemplifica el procedimiento para la primera corrida de la tabla II:

$$Q_r = C_d \cdot Q_t$$

Donde:

- Q_r = caudal real de paso de flujo con la ecuación general (l/s)
- C_d = coeficiente de descarga
- Q_t = caudal teórico (l/s)

$$Q_t = 0,682 \times 8,948 \text{ l/s}$$

$$Q_t = 6,103 \text{ l/s}$$

El procedimiento es el mismo para todos los datos del ensayo.

Tabla XXIII. Resultados orificio de 9,56 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída (Ac) cm ²	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh) Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	7,78	47,54	0,66	7,92	124,66	8,40	128,38	1,03	0,68	8,95	6,10
2	7,92	49,27	0,69	12,52	156,73	12,30	155,35	0,99	0,68	11,25	7,65
3	7,99	50,14	0,70	19,02	193,18	18,00	187,93	0,97	0,68	13,87	9,42
4	8,01	50,44	0,70	24,42	218,89	22,50	210,11	0,96	0,68	15,71	10,60
5	8,00	50,27	0,70	29,52	240,66	27,10	230,59	0,96	0,67	17,28	11,59
6	7,86	48,52	0,68	36,02	265,84	33,50	256,37	0,96	0,65	19,08	12,44
7	8,01	50,39	0,70	42,92	290,19	39,70	279,09	0,96	0,68	20,83	14,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Resultados orificio de 3,10 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh) Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con Ecuación General (l/s)
1	2,60	5,31	0,70	11,75	151,83	12,20	154,71	1,02	0,72	1,15	0,82
2	2,54	5,07	0,67	16,45	179,65	17,30	184,24	1,03	0,69	1,36	0,93
3	2,60	5,31	0,70	21,95	207,52	22,60	210,57	1,01	0,71	1,57	1,12
4	2,56	5,15	0,68	25,35	223,02	26,80	229,31	1,03	0,70	1,68	1,18
5	2,55	5,11	0,68	32,45	252,32	33,30	255,61	1,01	0,69	1,90	1,31
6	2,56	5,15	0,68	33,65	256,95	34,60	260,55	1,01	0,69	1,94	1,34
7	2,58	5,23	0,69	37,45	271,07	38,40	274,48	1,01	0,70	2,05	1,43

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. Resultados orificio de 5,10 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	4,24	14,12	0,69	3,65	84,62	5,80	106,68	1,26	0,87	1,73	1,51
2	4,25	14,19	0,69	6,35	111,62	8,10	126,06	1,13	0,78	2,28	1,79
3	4,21	13,92	0,68	8,75	131,02	10,50	143,53	1,10	0,75	2,68	2,00
4	4,25	14,19	0,69	20,45	200,31	21,60	205,86	1,03	0,71	4,09	2,92
5	4,22	13,99	0,68	24,95	221,25	25,40	223,24	1,01	0,69	4,52	3,12
6	4,27	14,32	0,70	29,55	240,78	30,70	245,42	1,02	0,71	4,92	3,51
7	4,28	14,39	0,70	35,05	262,24	34,70	260,92	0,99	0,70	5,36	3,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Resultados orificio de 6,02 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	4,95	19,24	0,68	5,99	108,41	7,60	122,11	1,13	0,76	3,09	2,35
2	4,96	19,32	0,68	9,29	135,01	11,40	149,56	1,11	0,75	3,84	2,89
3	5,05	20,03	0,70	13,19	160,87	14,10	166,33	1,03	0,73	4,58	3,33
4	4,92	19,01	0,67	30,29	243,78	30,30	243,82	1,00	0,67	6,94	4,64
5	4,95	19,24	0,68	30,69	245,38	31,80	249,78	1,02	0,69	6,98	4,81
6	4,86	18,55	0,65	36,19	266,47	38,50	274,84	1,03	0,67	7,58	5,10
7	4,93	19,09	0,67	43,59	292,44	43,80	293,15	1,00	0,67	8,32	5,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resultados orificio de 7,30 cm de diámetro**

No.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	6,12	29,42	0,70	7,85	124,10	8,4	128,38	1,03	0,73	5,19	3,78
2	6,08	29,03	0,69	13,05	160,01	13,4	162,14	1,01	0,70	6,70	4,71
3	6,11	29,32	0,70	17,85	187,14	18	187,92	1,00	0,70	7,83	5,51
4	6,11	29,32	0,70	22,65	210,81	22,7	211,04	1,00	0,70	8,82	6,19
5	6,12	29,42	0,70	27,55	232,49	27,4	231,86	1,00	0,70	9,73	6,82
6	6,09	29,13	0,70	32,85	253,87	32,6	252,91	1,00	0,69	10,63	7,37
7	6,09	29,13	0,70	37,35	270,70	37,4	270,89	1,00	0,70	11,33	7,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Resultados orificio de 8,38 cm de diámetro**

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	6,94	37,83	0,69	6,91	116,44	8,7	130,6	1,12	0,77	6,42	4,94
2	7,03	38,82	0,70	11,81	152,22	12,5	156,6	1,03	0,72	8,40	6,08
3	7,02	38,70	0,70	16,91	182,15	16,7	181,0	0,99	0,70	10,05	7,01
4	7,00	38,48	0,70	22,91	212,01	22,6	210,6	0,99	0,69	11,69	8,10
5	7,02	38,70	0,70	26,71	228,92	26,7	228,9	1,00	0,70	12,63	8,86
6	7,00	38,48	0,70	31,91	250,21	30,8	245,8	0,98	0,69	13,80	9,46
7	7,02	38,70	0,70	36,91	269,10	35,4	263,5	0,98	0,69	14,84	10,20

Fuente: elaboración propia

Tabla XXIX. Resultados orificio de 8,94 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	7,50	44,18	0,70	16,53	180,06	15,8	176,07	0,98	0,69	11,33	7,78
2	7,45	43,59	0,69	24,823	220,70	23,2	213,35	0,97	0,67	13,88	9,30
3	7,47	43,83	0,70	29,13	239,05	27	230,16	0,96	0,67	15,04	10,09
4	7,53	44,53	0,71	32,53	252,61	30,8	245,82	0,97	0,69	15,89	10,95
5	7,47	43,83	0,70	35,03	262,14	32,5	252,52	0,96	0,67	16,49	11,07
6	7,55	44,77	0,71	40,73	282,67	39	276,62	0,98	0,70	17,78	12,38
7	7,53	44,53	0,71	42,73	289,53	39,6	278,74	0,96	0,68	18,21	12,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Resultados orificio de 11,78 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	9,92	77,29	0,71	12,01	153,50	11,3	148,90	0,97	0,69	16,73	11,51
2	9,82	75,74	0,69	16,91	182,15	15,8	176,07	0,97	0,67	19,85	13,33
3	9,87	76,51	0,70	23,21	213,40	20,6	201,04	0,947	0,66	23,26	15,38
4	9,89	76,82	0,70	27,91	234,01	24,3	218,35	0,93	0,66	25,50	16,77
5	9,87	76,51	0,70	33,41	256,03	29,1	238,94	0,93	0,66	27,90	18,28
6	9,88	76,67	0,70	39,31	277,72	34,1	258,66	0,93	0,66	30,27	19,83
7	9,95	77,76	0,71	19,61	196,15	17,1	183,17	0,93	0,67	21,38	14,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Resultados orificio de 13,33 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	11,72	107,88	0,77	11,24	148,47	10,1	140,77	0,95	0,73	20,72	15,19
2	11,54	104,59	0,75	15,84	176,26	13,4	162,15	0,92	0,69	24,60	16,96
3	11,65	106,60	0,76	21,94	207,45	18,6	191,03	0,92	0,70	28,95	20,36
4	11,63	106,23	0,76	26,04	226,01	21,2	203,95	0,90	0,69	31,54	21,67
5	11,65	106,60	0,76	31,04	246,76	27	230,16	0,93	0,71	34,44	24,53
6	11,64	106,41	0,76	35,54	264,04	28,9	238,12	0,90	0,69	36,85	25,34
7	11,57	105,14	0,75	39,54	278,51	33,1	254,84	0,92	0,69	38,87	26,79

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Resultados orificio de 15,06 cm de diámetro

Núm.	Φ_c (cm)	Área Contraída Ac (cm ²)	Coefficiente de Contracción (C_c)	Carga (y) cm	Velocidad Teórica (V2) cm/s	(Δh)Tubo de Pitot (cm)	Velocidad Real (cm/s)	Coefficiente de Velocidad (Cv)	Coefficiente de Descarga (Cd)	Caudal Teórico (l/s)	Caudal con ecuación general (l/s)
1	12,77	128,08	0,72	11,27	148,70	10,2	141,47	0,95	0,68	26,49	18,12
2	12,74	127,48	0,72	15,77	175,90	13,5	162,75	0,93	0,66	31,33	20,75
3	12,80	128,68	0,72	22,57	210,43	19	193,08	0,92	0,66	37,48	24,84
4	12,95	131,71	0,74	26,57	228,32	22,4	209,64	0,92	0,68	40,67	27,61
5	12,64	125,48	0,70	31,27	247,70	26,7	228,88	0,92	0,65	44,12	28,72
6	12,76	127,88	0,72	35,27	263,06	29,8	241,80	0,92	0,66	46,86	30,92
7	12,75	127,68	0,72	40,07	280,39	33	254,45	0,91	0,65	49,95	32,49

Fuente: elaboración propia.

3.5.1.1. Modelo matemático núm. 1

Al relacionar el caudal promedio observado versus el caudal teórico en una gráfica con una línea de tendencia se obtiene la ecuación generada específica para el orificio ensayado:

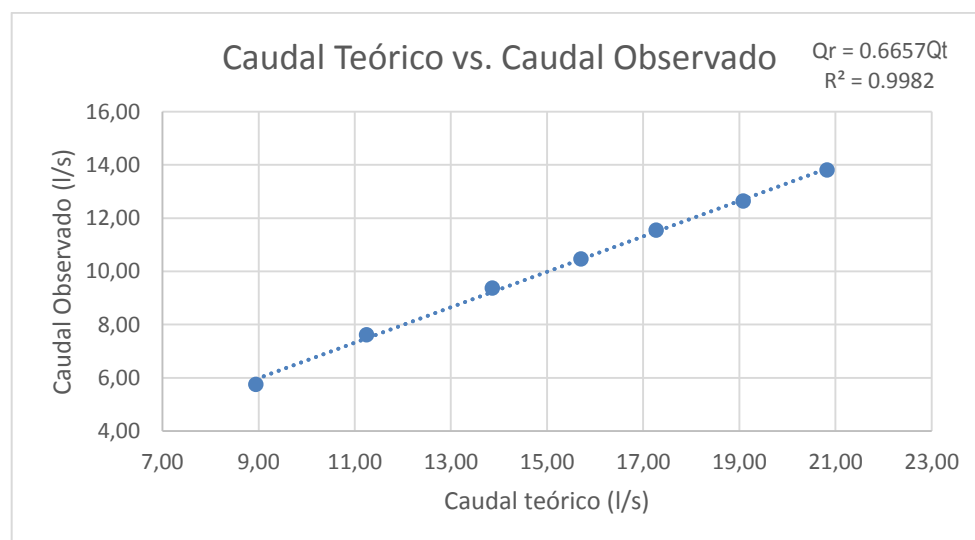
Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 9,56 cm de diámetro

Tabla XXXIII. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 9,56 cm de diámetro**

Núm.	Caudal Teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	8,95	5,76
2	11,20	7,61
3	13,87	9,37
4	15,71	10,46
5	17,28	11,55
6	19,08	12,64
7	20,83	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 9,56 cm de diámetro**



Fuente: elaboración propia.

Con la gráfica anterior y la línea de tendencia se obtiene la ecuación del coeficiente de descarga para el orificio de 9,56 cm de diámetro.

$$C_d = 0.6657 * \Phi_o \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

- C_d = coeficiente de descarga.
- 0.6657 = factor de corrección correspondiente para el orificio de 9,56 cm de diámetro.
- Φ_o = diámetro del orificio (cm).

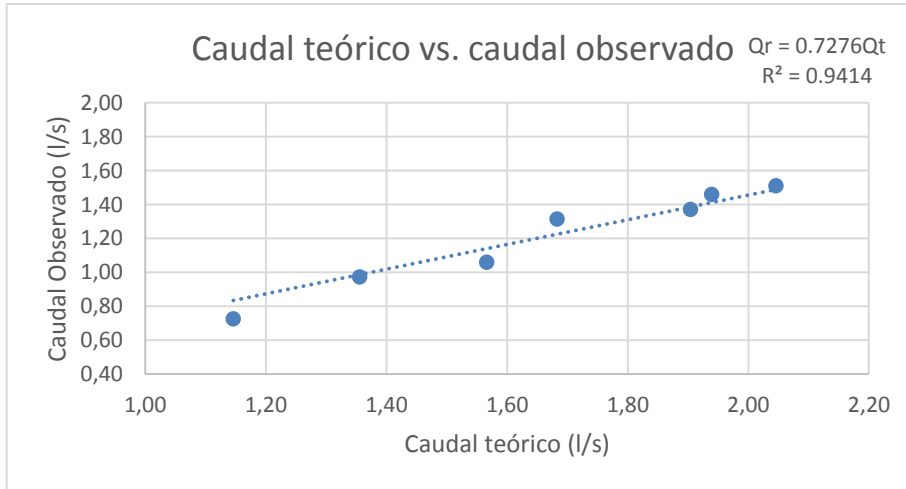
El procedimiento es el mismo para todos los orificios.

Tabla XXXIV. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 3,10 cm de diámetro**

Núm.	Caudal Teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	1,15	0,73
2	1,36	0,97
3	1,57	1,06
4	1,68	1,32
5	1,90	1,37
6	1,94	1,46
7	2,05	1,51

Fuente: elaboración propia

Figura 29. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 3,10 cm de diámetro**



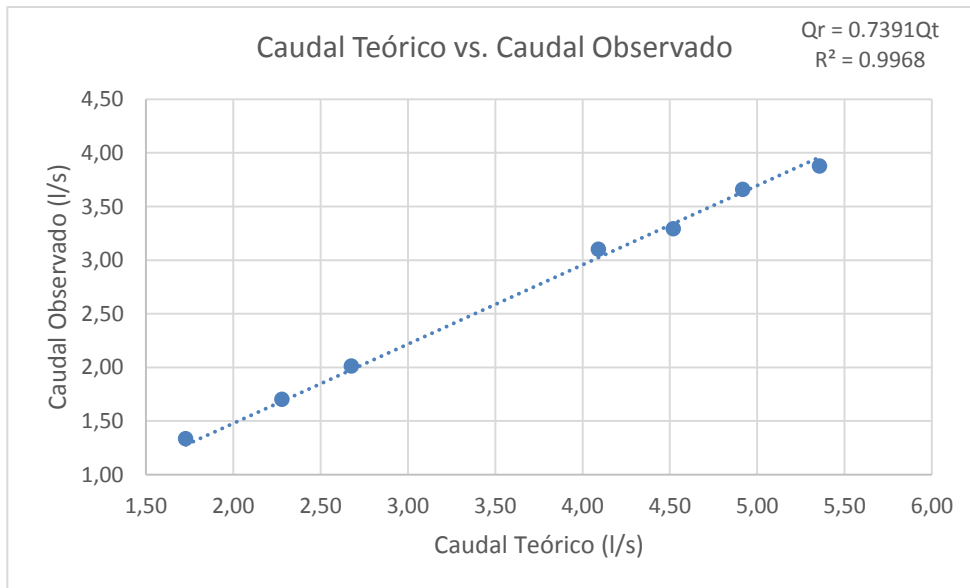
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 5,10 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	1,73	1,33
2	2,28	1,70
3	2,68	2,01
4	4,09	3,10
5	4,52	3,29
6	4,92	3,66
7	5,36	3,88

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 5,10 cm de diámetro**



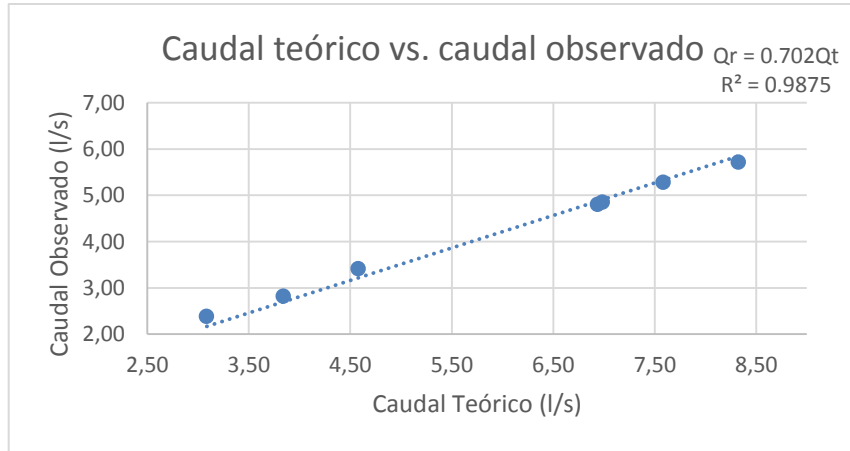
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 6,02 cm de diámetro**

Núm.	Caudal Teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	3,09	2,39
2	3,84	2,82
3	4,58	3,42
4	6,94	4,81
5	6,98	4,86
6	7,58	5,29
7	8,32	5,72

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 6,02 cm de diámetro**



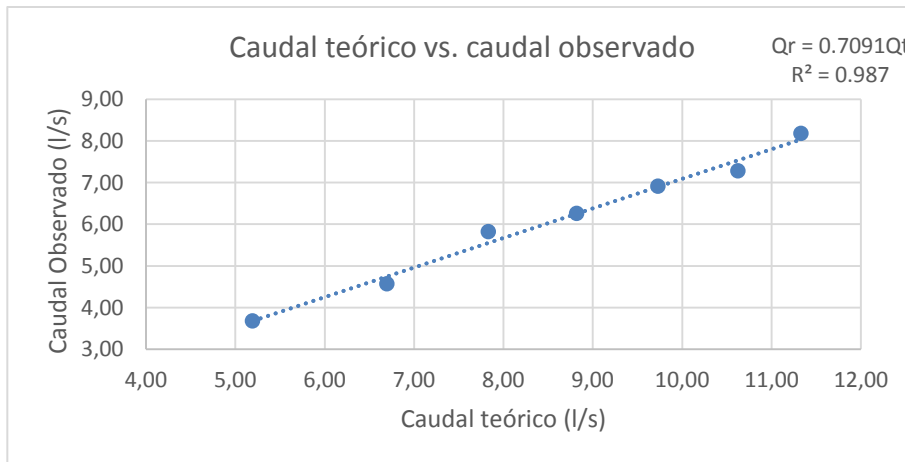
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 7,30 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	5,19	3,68
2	6,70	4,57
3	7,83	5,82
4	8,82	6,26
5	9,73	6,91
6	10,63	7,28
7	11,33	8,18

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 7,30 cm de diámetro**



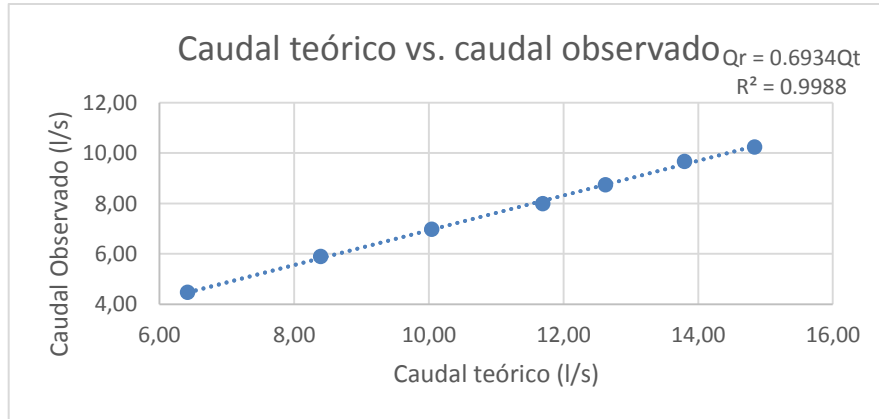
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 8,38 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	6,42	4,48
2	8,40	5,89
3	10,05	6,97
4	11,69	8,00
5	12,63	8,74
6	13,80	9,67
7	14,84	10,24

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 8,38 cm de diámetro**



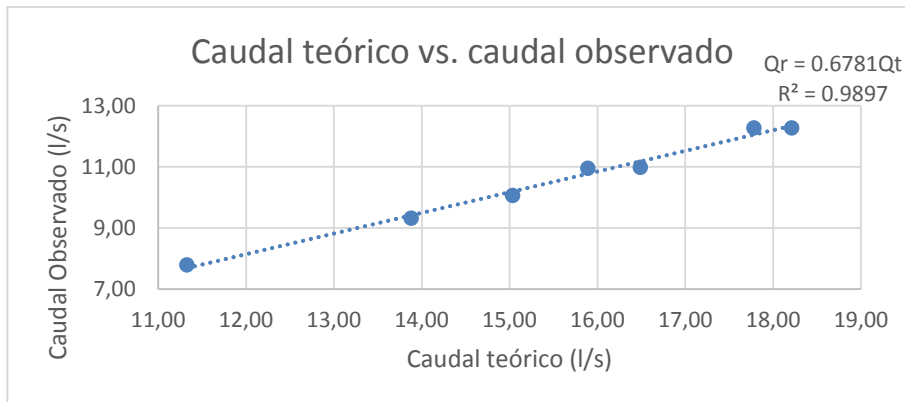
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 8,94 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	11,33	7,79
2	13,88	9,32
3	15,04	10,06
4	15,89	10,96
5	16,49	10,99
6	17,78	12,27
7	18,21	12,28

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 8,94 cm de diámetro**



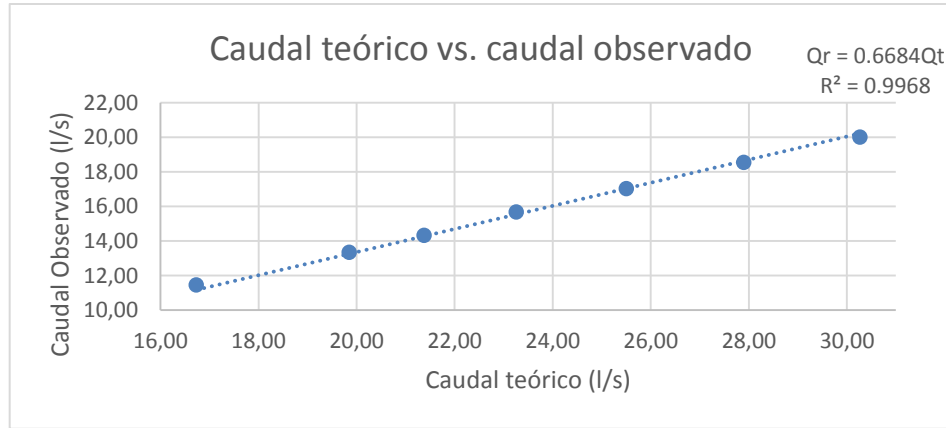
Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 11,78 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	16,73	11,47
2	19,85	13,35
3	23,26	15,69
4	25,50	17,02
5	27,90	18,54
6	30,27	20,01
7	21,38	14,32

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 11,78 cm de diámetro**



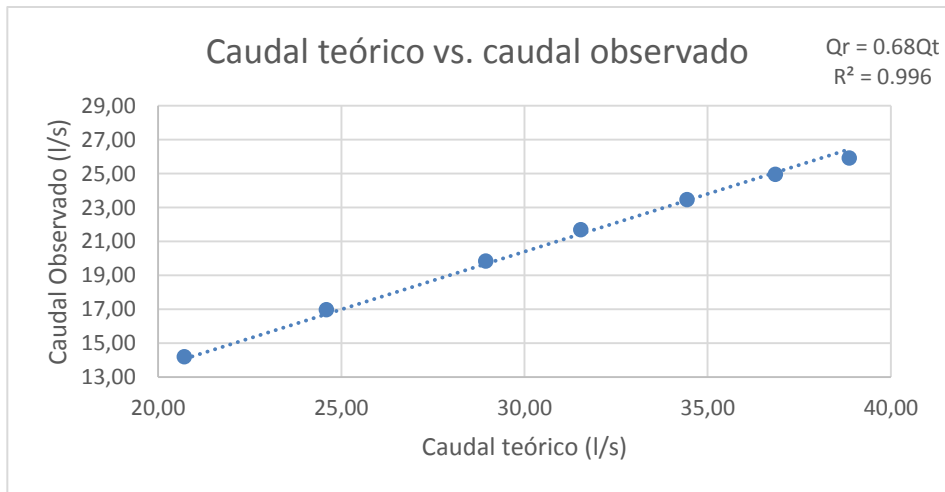
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 13,33 cm de diámetro**

Núm.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	20,72	14,21
2	24,60	16,97
3	28,95	19,85
4	31,54	21,70
5	34,44	23,47
6	36,85	24,96
7	38,87	25,92

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 13,33 cm de diámetro**



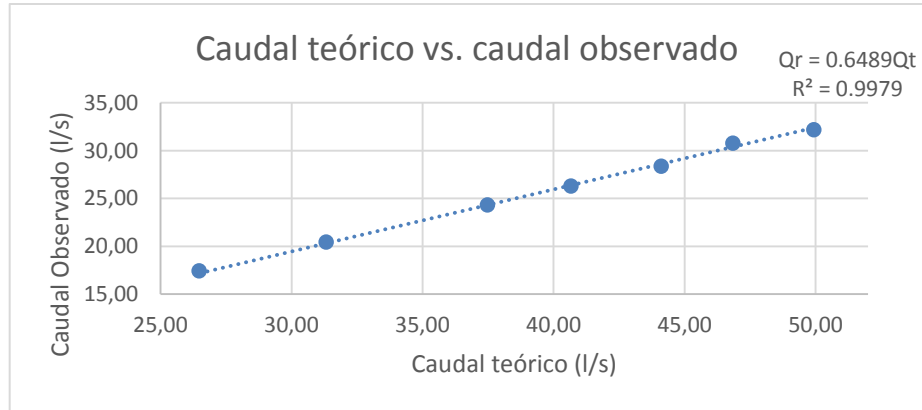
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Caudal promedio observado y caudal teórico en el orificio de 15,06 cm de diámetro**

NÚM.	Caudal teórico (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	26,49	17,44
2	31,33	20,46
3	37,48	24,32
4	40,67	26,28
5	44,12	28,36
6	46,86	30,78
7	49,95	32,17

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfico del caudal teórico y del caudal promedio observado para el orificio de 15,06 cm de diámetro**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Factores de corrección para la ecuación de calibración del caudal generado**

Núm.	DIÁMETRO	FACTOR DE CORRECCIÓN
1	3,10	0,728
2	5,10	0,739
3	6,01	0,702
4	7,30	0,709
5	8,38	0,693
6	8,95	0,678
7	9,56	0,666
8	11,78	0,668
9	13,33	0,680
10	15,06	0,649

Fuente: elaboración propia.

Con valores de los factores de corrección, obtenidos por la línea de tendencia y la ecuación del coeficiente de descarga específico de los gráficos del caudal teórico versus caudal observado, se complementa el modelo

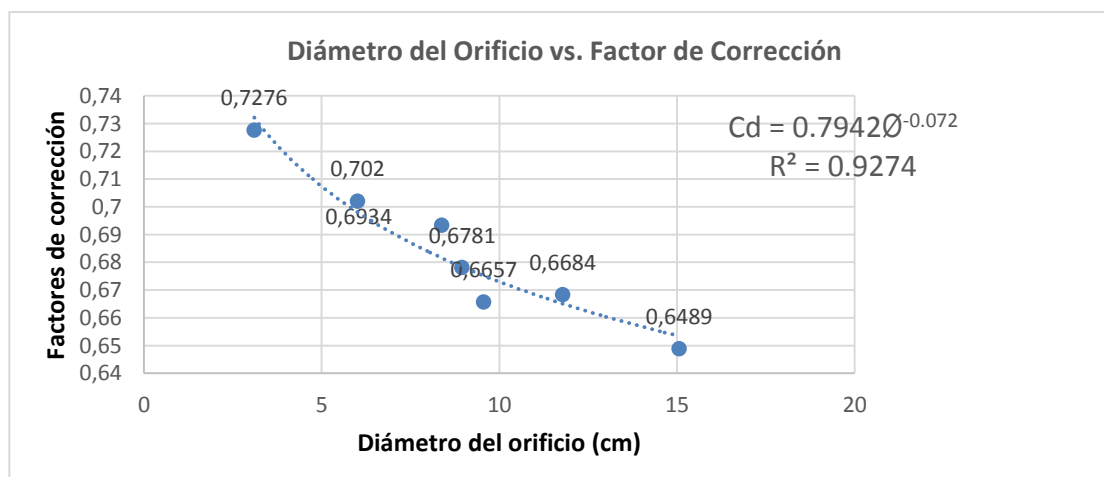
matemático de calibración respecto al diámetro de los orificios ensayados con la línea de tendencia de los puntos de la gráfica y su ecuación potencial correspondiente; sin embargo, de acuerdo a la precisión de la ecuación del modelo de calibración se consideran únicamente los siguientes 7 valores de factores de corrección:

Tabla XLIV. **Factores de corrección válidos generados por los gráficos de caudal teórico vs caudal observado**

Núm.	DIÁMETRO	FACTOR DE CORRECCIÓN
1	3.1	0.7276
2	6.01	0.702
3	8.38	0.6934
4	8.95	0.6781
5	9.56	0.6657
6	11.78	0.6684
7	15.06	0.6489

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Gráfico del diámetro vs factor de corrección**



Fuente: elaboración propia.

Con la gráfica anterior y la línea de tendencia se obtiene la ecuación potencial de calibración para el coeficiente de descarga del modelo matemático núm. 1.

$$C_{dm1} = 0.7942 * \Phi_o^{-0.072} \quad (\text{Ec. 28})$$

Se corroboró que si el coeficiente de descarga se dejase en función del área genera el mismo producto que al dejarlo en términos del diámetro.

Se sustituye el valor del coeficiente de descarga del modelo matemático núm. 1 en la ecuación 15 para el caudal:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gy}$$

$$Q_{m1} = 0,7942 * \Phi_o^{-0,072} * A_o * \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 29})$$

3.5.1.2. Modelo matemático núm. 2

Al relacionar el caudal promedio observado versus el caudal con ecuación general en una gráfica con una línea de tendencia se obtiene la ecuación generada específica para el orificio ensayado:

Tabla XLV. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 9,56 cm de diámetro**

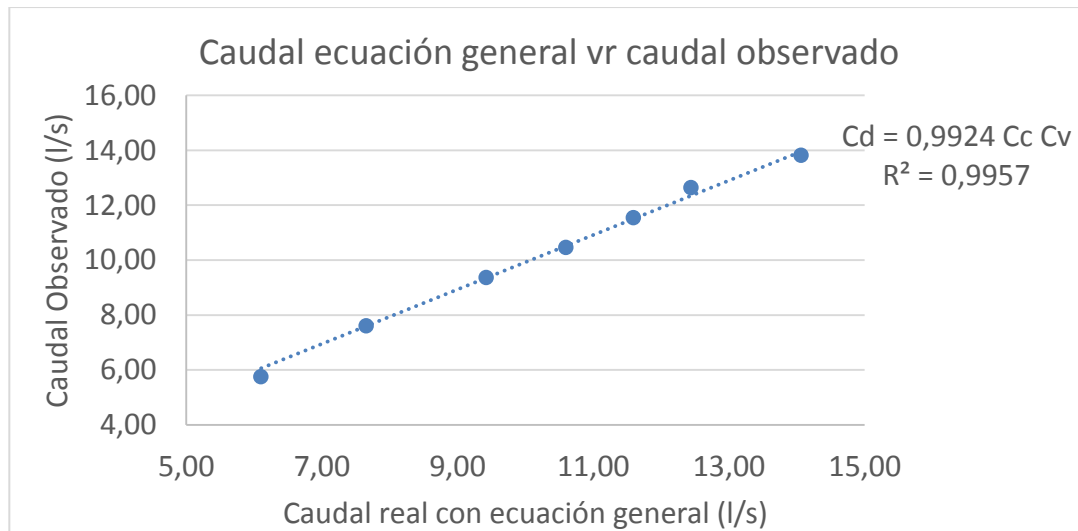
Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	6,103	5,755
2	7,653	7,611
3	9,423	9,370
4	10,598	10,459

Continuación de la tabla XLV.

5	11,591	11,546
6	12,440	12,639
7	14,064	13,812

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 9,56 cm de diámetro**



Fuente: elaboración propia.

Con la gráfica anterior y la línea de tendencia se obtiene la ecuación del coeficiente de descarga específico para el orificio de 9.56 cm de diámetro.

$$C_d = 0.9924 C_c C_v \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde:

- C_d = coeficiente de descarga.
- 0,9924 = factor de corrección correspondiente para el orificio de 9,56 cm de diámetro.
- C_v = coeficiente de velocidad.
- C_c = coeficiente de contracción.

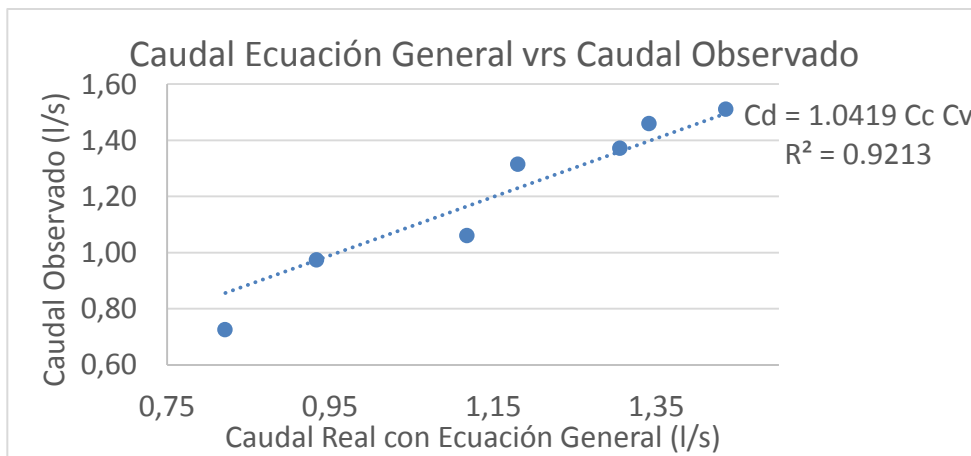
El procedimiento es el mismo para todos los orificios.

Tabla XLVI. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 3,10 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	0,82	0,73
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 3,10 cm de diámetro**



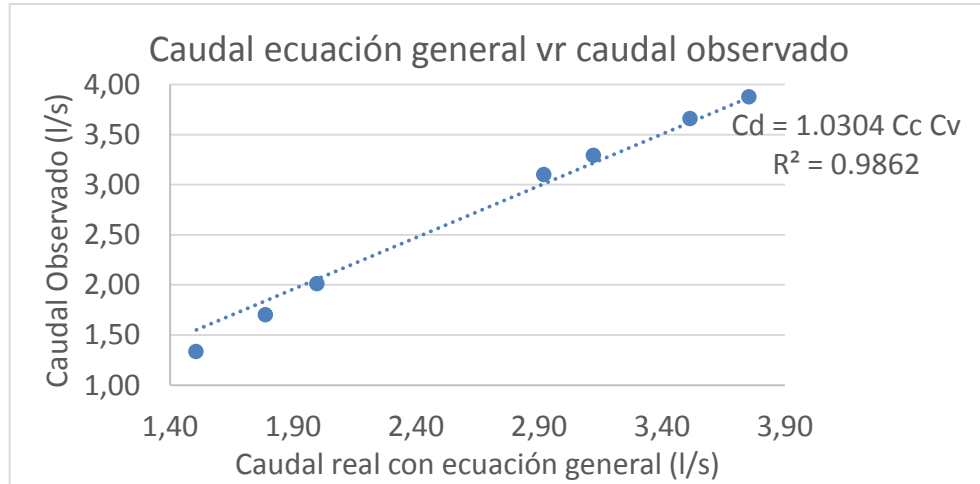
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 5,10 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	1,51	1,33
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 5,10 cm de diámetro**



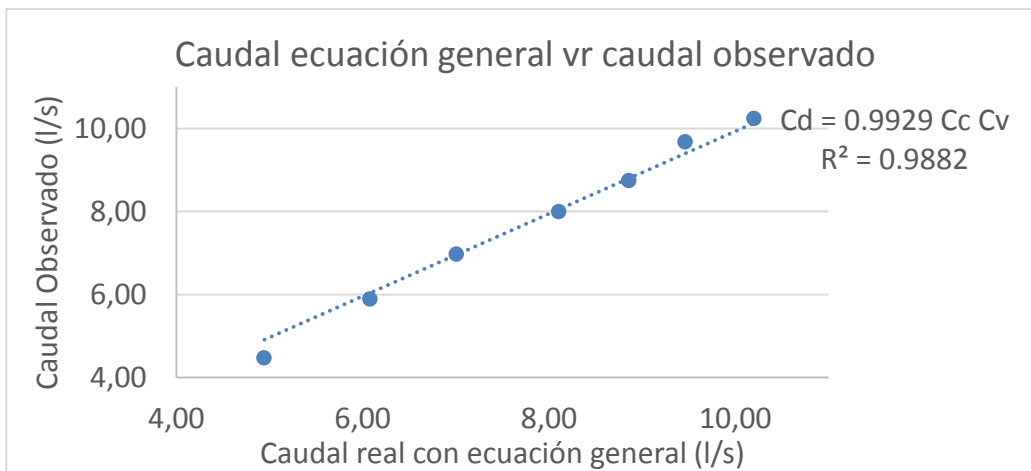
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 6,02 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	2,35	2,39
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 8,38 cm de diámetro**



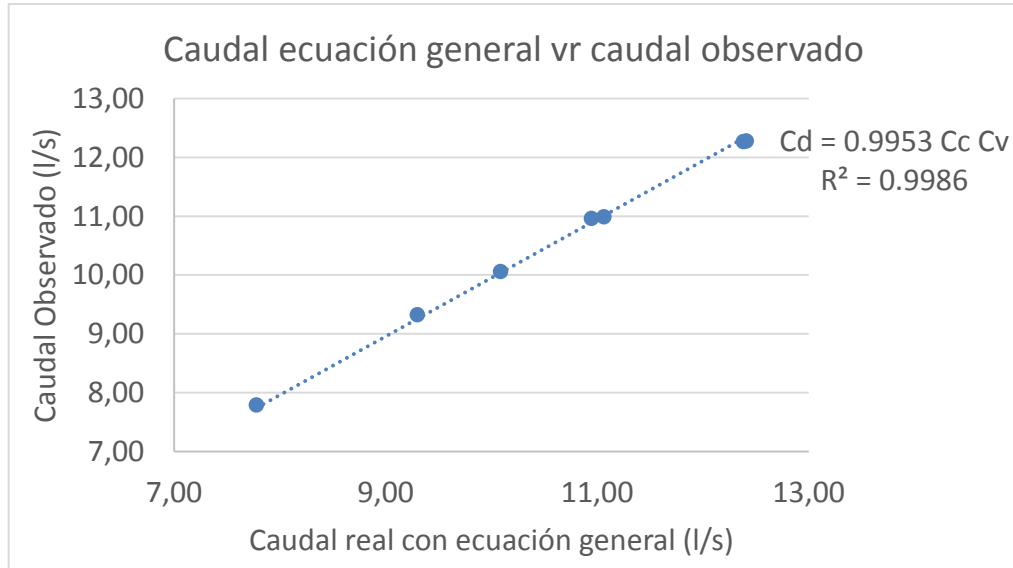
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 8,94 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	7,78	7,79
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 8,94 cm de diámetro**



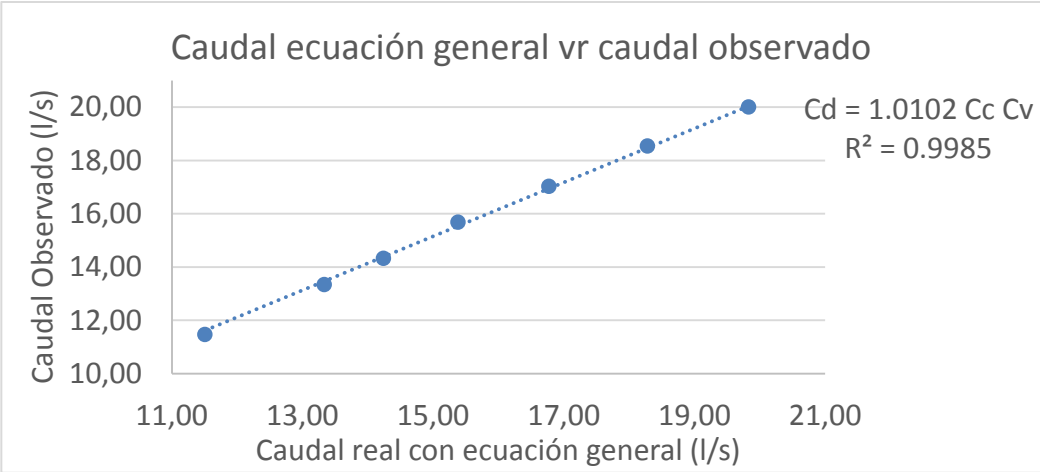
Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 11,78 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	11,51	11,47
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 11,78 cm de diámetro**



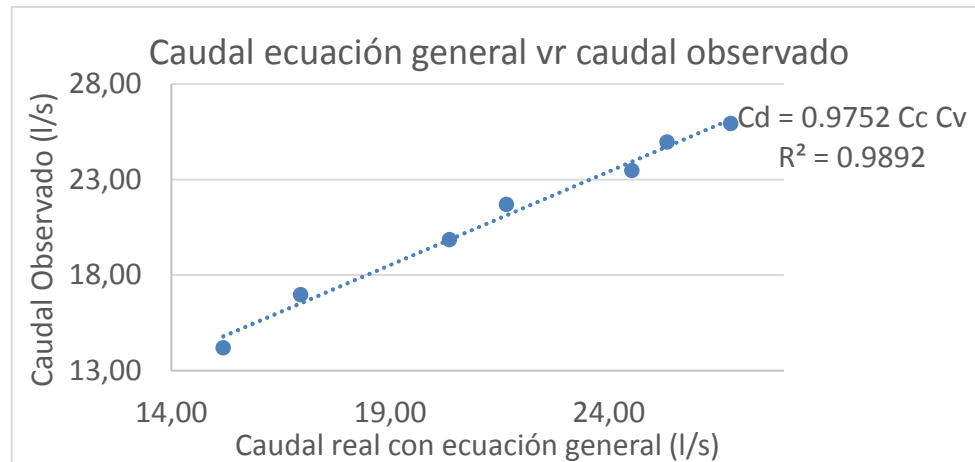
Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 13,33 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	15,19	14,21
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 13,33 cm de diámetro**



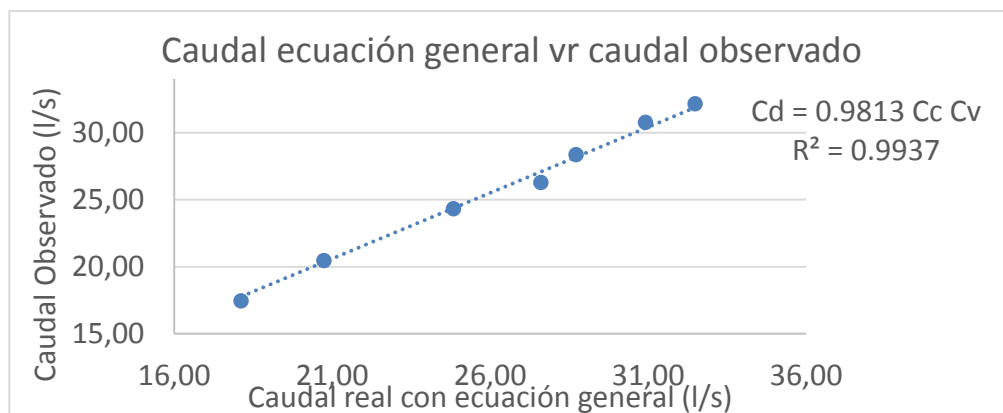
Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Caudal promedio observado y caudal con ecuación general en el orificio de 15,06 cm de diámetro**

Núm.	Caudal con ecuación general (l/s)	Caudal observado (l/s)
1	18,12	17,44
2	7,65	7,61
3	9,42	9,37
4	10,60	10,46
5	11,59	11,55
6	12,44	12,64
7	14,06	13,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfico del caudal con ecuación general y caudal promedio observado para el orificio de 15,06 cm de diámetro**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Factores de corrección para la ecuación de calibración del caudal generado**

Núm.	Diámetro	Factor de corrección (F_c)
1	3,10	1,042
2	5,10	1,030
3	6,01	1,023
4	7,30	1,013
5	8,38	0,993
6	8,95	0,995
7	9,56	0,992
8	11,78	1,010
9	13,33	0,975
10	15,06	0,981

Fuente: elaboración propia.

Con valores de los factores de corrección, obtenidos por la línea de tendencia y la ecuación del coeficiente de descarga de los gráficos del caudal real con ecuación general versus caudal observado, se complementa el modelo

matemático de calibración respecto al diámetro de los orificios ensayados con la línea de tendencia de los puntos de la gráfica y su ecuación potencial correspondiente.

Se sustituye el valor del coeficiente de descarga del modelo matemático núm. 2 en la ecuación 15 para el caudal:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gy}$$

$$Q = F_c C_c C_v A_o \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 31})$$

Se sustituye en la ecuación 31 el valor del factor de corrección (F_c) para cada uno de los diámetros, se ejemplifica la ecuación sustituida para el séptimo diámetro ensayado.

$$Q = 0,9924 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$$

El procedimiento es el mismo para todos los orificios.

Tabla LIV. **Ecuaciones del modelo matemático núm. 2**

Núm.	Diámetro	Ecuaciones del modelo matemático núm. 2
1	3,10	$Q = 1,0419 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
2	5,10	$Q = 1,0304 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
3	6,01	$Q = 1,0225 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
4	7,30	$Q = 1,0127 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
5	8,38	$Q = 0,9929 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
6	8,95	$Q = 0,9953 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
7	9,56	$Q = 0,9924 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$
8	11,78	$Q = 1,0102 C_c C_v A_o \sqrt{2gy}$

Continuación de la tabla LIV.

9	13,33	$Q = 0,9752C_vA_o\sqrt{2gy}$
10	15,06	$Q = 0,9813C_cC_vA_o\sqrt{2gy}$

Fuente: elaboración propia.

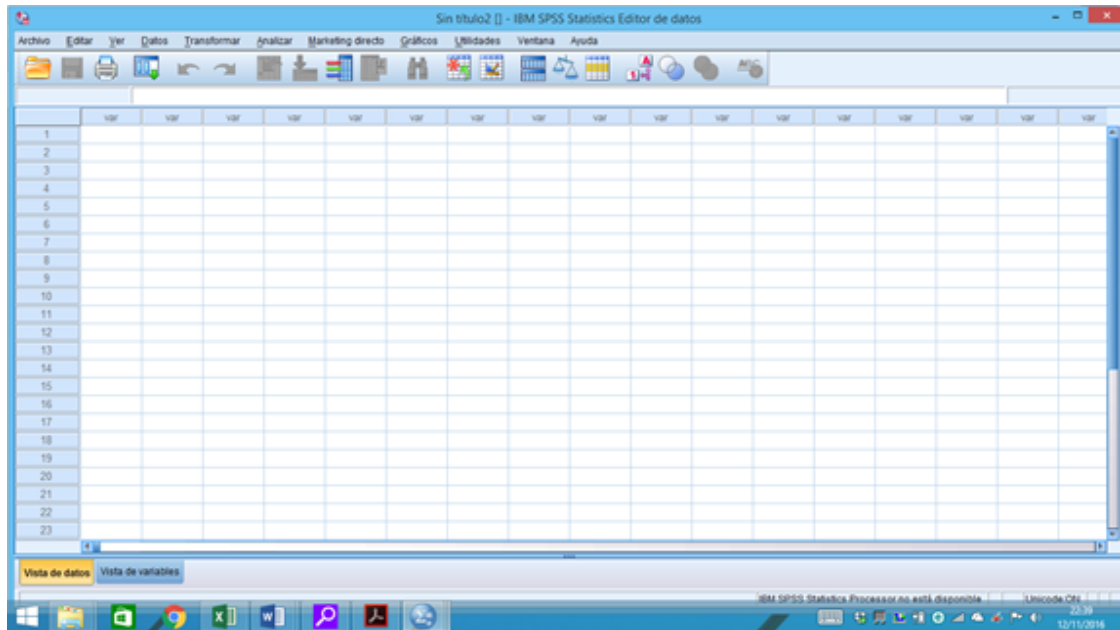
3.5.2. Obtención de modelos matemáticos con programa estadístico SPSS

Se implementó el programa SPSS statistics 22, este es un programa estadístico informático con capacidad para trabajar grandes bases de datos y con sencillas interfaces de análisis. Dicho programa se emplea para la investigación en las ciencias exactas, sociales y aplicadas.

A continuación, se mostrará el cumplimiento de uno de los objetivos de esta investigación la cual presenta 2 nuevos modelos matemáticos que calibren la ecuación del flujo en orificios circulares de pared delgada con distintos diámetros.

Se generará un modelo matemático que es empleado para cualquier área de orificios de pared delgada, relacionar los valores de las cargas y el caudal observado en los ensayos.

Figura 47. **SPSS Statistics 22 programa estadístico informático**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 22.

3.5.2.1. **Modelo matemático núm. 3**

Al determinar la ecuación para cada orificio de pared delgada con diámetros variables se observa que el coeficiente de descarga no es constante, por lo cual el programa estadístico SPSS determinará un modelo que permitirá relacionar las constantes con la carga, el área de los diámetros respectivos de los ensayos y caudales observados; estos modelos podrán ser empleados para cualquier diámetro de orificios y cargas.

En el programa se hará un análisis de regresión no lineal, señalando como variables dependientes el caudal para encontrar las correcciones K_1 y K_2 .

Al ingresar los datos obtenidos de todos los ensayos de orificios de pared delgada, se define la ecuación, que se ingresará como una ecuación para los orificios de pared delgada:

$$Q = K_1 * A_o * \sqrt{2g} * y^{k_2} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

- Q = caudal (l/s)
- K_1 y K_2 = valores de los parámetros a estimados con SPSS
- A_o = área de la sección transversal del orificio de pared delgada (cm^2)
- g = aceleración de la gravedad ($981 \frac{cm}{s^2}$)
- y = carga (cm)

De acuerdo a la solicitud del análisis se determina la estimación de los parámetros.

Figura 48. **Análisis de regresión no lineal**

Número de iteración ^a	Suma de cuadrados residual	Parámetro	
		K1	K2
1.0	7,787E+11	1,000	1,000
1.1	48818,120	,000	1,000
2.0	48818,120	,000	1,000
2.1	3709,553	,000	,804
3.0	3709,553	,000	,804
3.1	29,333	,001	,575
4.0	29,333	,001	,575
4.1	28,617	,001	,477
5.0	28,617	,001	,477
5.1	10,804	,001	,478
6.0	10,804	,001	,478
6.1	10,804	,001	,478
7.0	10,804	,001	,478
7.1	10,804	,001	,478

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 22.

Figura 49. **Estimación de parámetros**

Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K1	,001	,000	,001	,001
K2	,478	,009	,460	,497

	K1	K2
K1	1,000	-,993
K2	-,993	1,000

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	11927,093	2	5963,546
Residuo	10,804	68	,159
Total sin corrección	11937,897	70	
Total corregido	4575,114	69	

Variable dependiente: Q^a

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 22.

Al definir el modelo matemático núm. 3 con el programa SPSS statistics 22, los parámetros estimados son:

$$K_1 = 0,001$$

$$K_2 = 0,478$$

Al sustituir los valores K_1 y K_2 en la ecuación 32, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = 0,001 * A_o * \sqrt{2g} * y^{0.478} \quad (\text{Ec. 33})$$

Figura 50. **Análisis de regresión no lineal**

Número de iteración ^a	Suma de cuadrados residual	Parámetro
		k1
1.0	2,518E+10	1.000
1.1	156.702	.001
2.0	156.702	.001
2.1	156.702	.001

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 22.

Figura 51. **Estimación de parámetros**

Estimaciones de parámetro				
Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
k1	.001	.000	.001	.001

ANOVA ^a			
Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	11911.060	1	11911.060
Residuo	156.702	48	3.265
Total sin corrección	12067.762	49	
Total corregido	2662.697	48	

Variable dependiente: Qr

a. R cuadrado = 1 - (Suma de cuadrados residual) / (Suma de cuadrados corregida) = .941.

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 22.

3.5.2.2. Modelo matemático núm. 4

Para el cuarto modelo matemático también se utilizará el programa SPSS statistics 22, el cual hará un análisis de regresión no lineal, para la ecuación:

$$Q = K_1 * A_o * \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

- Q= caudal (l/s)
- K_1 = valor del parámetro a estimar con SPSS
- A_o = área de la sección transversal del orificio de pared delgada (cm^2)
- g= aceleración de la gravedad ($981 \frac{cm}{s^2}$)

- $y =$ carga (cm)

Posteriormente a la solicitud de análisis se estima el valor del parámetro para la ecuación 34, y se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = 0,001 * A_o * \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 34})$$

3.5.3. Comparación de modelos matemáticos

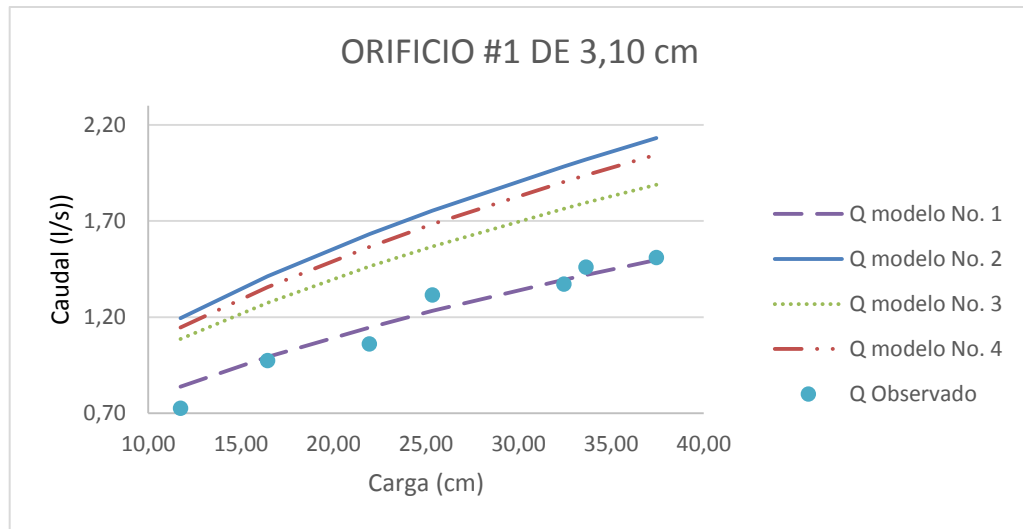
Se muestra la comparación de los caudales generados con los cuatro modelos y el caudal real observado, respecto a la carga.

Tabla LV. **Valores del gráfico generado y observado vs carga para el orificio de 3,10 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
11,75	0,73	0,84	21,61	1,19	44,92	1,09	42,61	1,15	39,41
16,45	0,97	0,99	6,84	1,41	53,45	1,28	51,50	1,36	48,42
21,95	1,06	1,15	13,06	1,63	59,70	1,46	58,01	1,57	55,06
25,35	1,32	1,23	11,90	1,75	62,50	1,57	60,93	1,68	58,05
32,45	1,37	1,40	0,84	1,98	66,86	1,76	65,47	1,90	62,72
33,65	1,46	1,42	2,06	2,02	67,45	1,80	66,09	1,94	63,36
37,45	1,51	1,50	0,61	2,13	69,15	1,89	67,85	2,05	65,19

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Gráfico del caudales generado y observado vs carga para el orificio de 3,10 cm de diámetro**



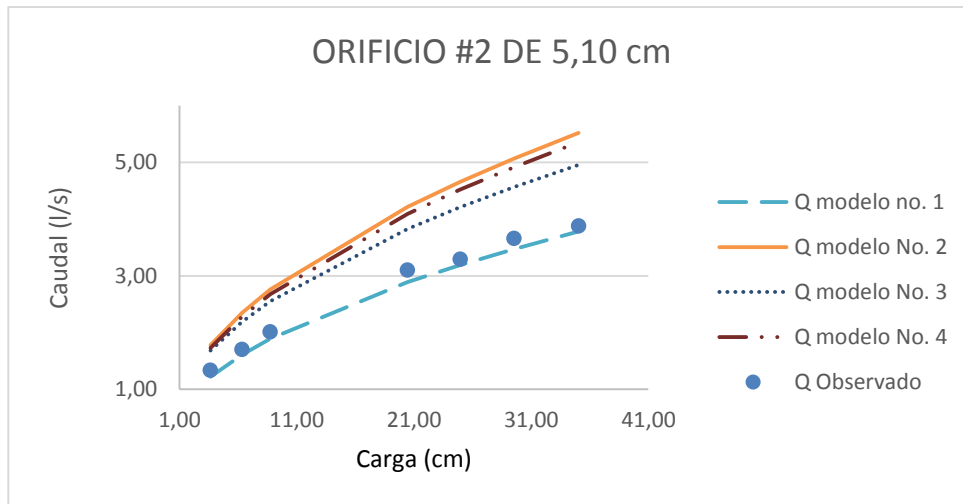
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Valores del gráfico de caudales generado y observado vs. carga para el orificio de 5,10 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
3.65	1,33	1,22	9,28	1,78	63,08	1,68	61,96	1,73	60,86
6.35	1,70	1,61	5,65	2,35	72,01	2,19	71,16	2,28	69,96
8.75	2,01	1,89	6,41	2,76	76,15	2,55	75,43	2,68	74,23
20.45	3,10	2,89	7,28	4,22	84,40	3,83	83,93	4,09	82,82
24.95	3,29	3,19	3,12	4,66	85,88	4,21	85,45	4,52	84,38
29.55	3,66	3,47	5,34	5,07	87,02	4,57	86,63	4,92	85,60
35.05	3,88	3,78	2,51	5,52	88,09	4,95	87,72	5,36	86,72

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 5,10 cm de diámetro**



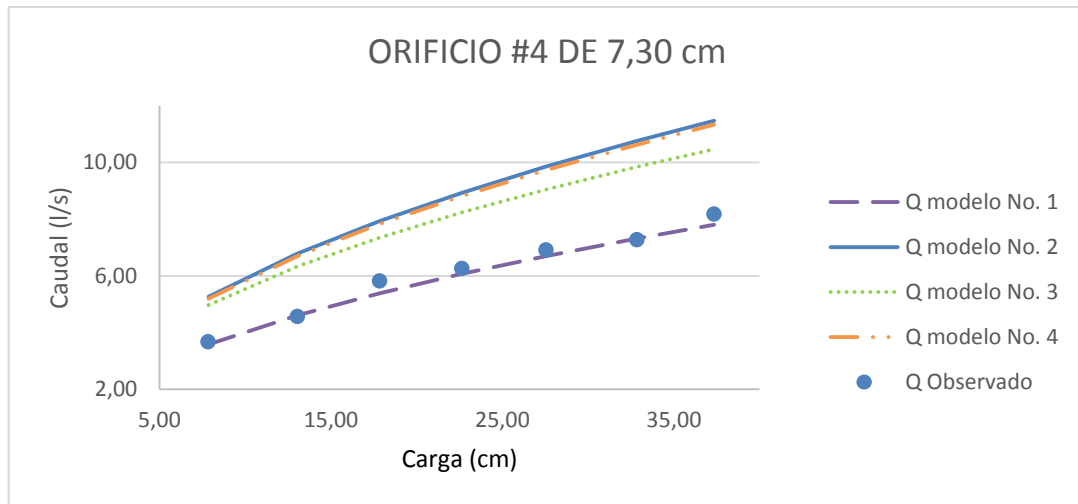
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Valores del gráfico caudales generado y observado vs carga para el orificio de 6,02 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
5.99	2,39	2,15	10,80	3,16	79,16	2,97	78,69	3,09	77,83
9.29	2,82	2,68	5,11	3,93	83,26	3,66	82,89	3,84	82,03
13.19	3,42	3,12	6,89	4,68	85,95	4,33	85,64	4,58	84,80
30.29	4,81	4,84	0,75	7,10	90,73	6,44	90,52	6,94	89,78
30.69	4,86	4,87	0,37	7,14	90,79	6,48	90,58	6,99	89,85
36.19	5,27	5,29	0,14	7,76	91,52	7,01	91,33	7,58	90,62
43.59	5,72	5,81	1,51	8,51	92,27	7,66	92,10	8,33	91,41

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 7,30 cm de diámetro**



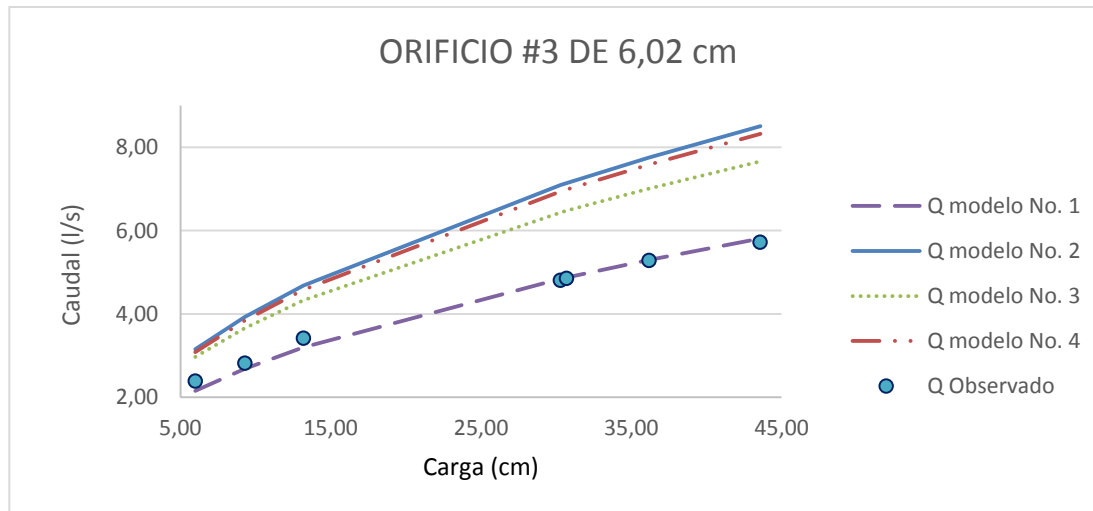
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Valores del gráfico de caudales generado y observado vs carga para el orificio de 7,30 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
7.85	3,68	3,58	2,92	5,26	87,50	4,96	87,34	5,19	86,75
13.05	4,57	4,61	0,82	6,78	90,30	6,33	90,18	6,70	89,61
17.85	5,82	5,39	7,98	7,93	91,71	7,35	91,60	7,83	91,05
22.65	6,26	6,07	3,03	8,94	92,64	8,24	92,55	8,82	92,02
27.55	6,92	6,70	3,24	9,85	93,33	9,05	93,24	9,73	92,73
32.85	7,28	7,31	0,49	10,76	93,89	9,84	93,81	10,63	93,32
37.35	8,18	7,80	4,91	11,47	94,27	10,46	94,20	11,33	93,71

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 6,02 cm de diámetro**



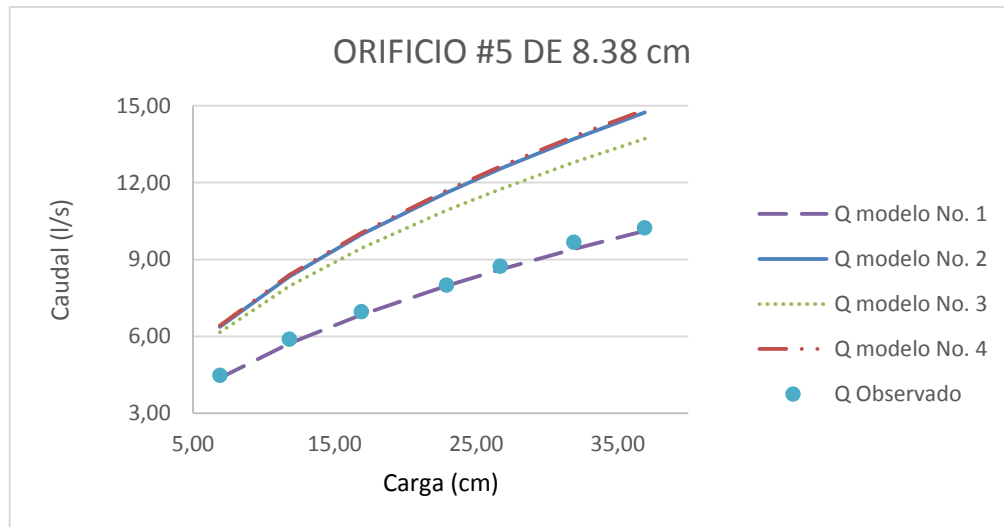
Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Valores del gráfico caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,38 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
6.91	4,48	4,38	2,28	6,38	89,69	6,16	89,76	6,42	89,31
11.81	5,89	5,72	3,00	8,34	92,11	7,95	92,17	8,40	91,37
16.91	6,97	6,85	1,81	9,98	93,41	9,44	93,45	10,05	93,03
22.91	8,00	7,97	0,36	11,61	94,34	10,92	94,38	11,69	93,97
26.71	8,74	8,60	1,58	12,54	94,75	11,75	94,79	12,63	94,40
31.91	9,67	9,40	2,86	13,70	95,20	12,79	95,23	13,80	94,86
36.91	10,24	10,12	1,24	14,74	95,54	13,71	95,57	14,84	95,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,38 cm de diámetro**



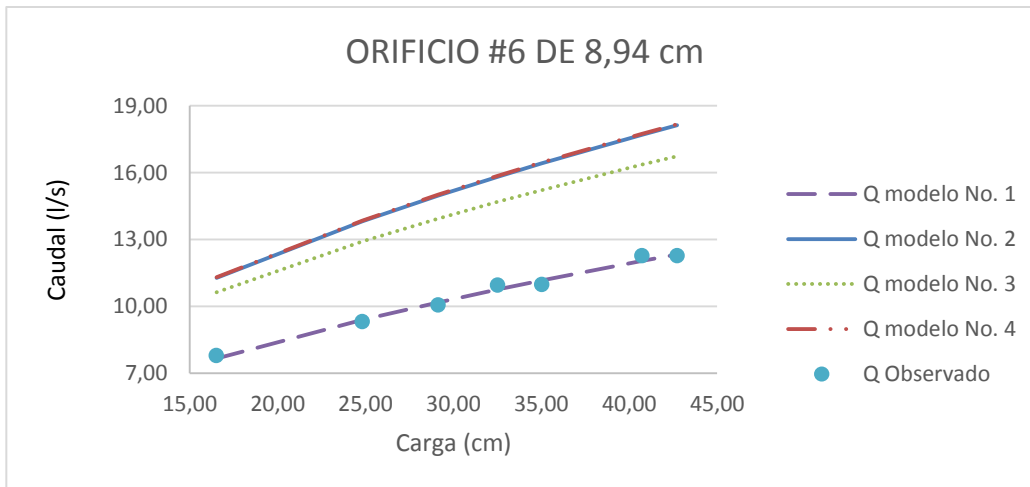
Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,94 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 4	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 4	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 4	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
16.53	7,79	7,67	1,62	11,28	94,17	10,63	94,18	11,30	93,81
24.83	9,32	9,40	0,79	13,82	95,24	12,91	95,25	13,85	94,91
29.13	10,06	10,18	1,14	14,97	95,61	13,93	95,62	15,01	92,28
32.53	10,96	10,76	1,90	15,82	95,84	14,69	95,85	15,86	95,52
35.03	10,99	11,16	1,55	16,42	95,99	15,22	96,00	16,46	95,68
40.73	12,27	12,04	1,95	17,70	96,28	16,35	96,29	17,74	95,98
42.73	12,28	12,33	0,41	18,13	96,37	16,73	96,38	18,17	96,07

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 8,94 cm de diámetro**



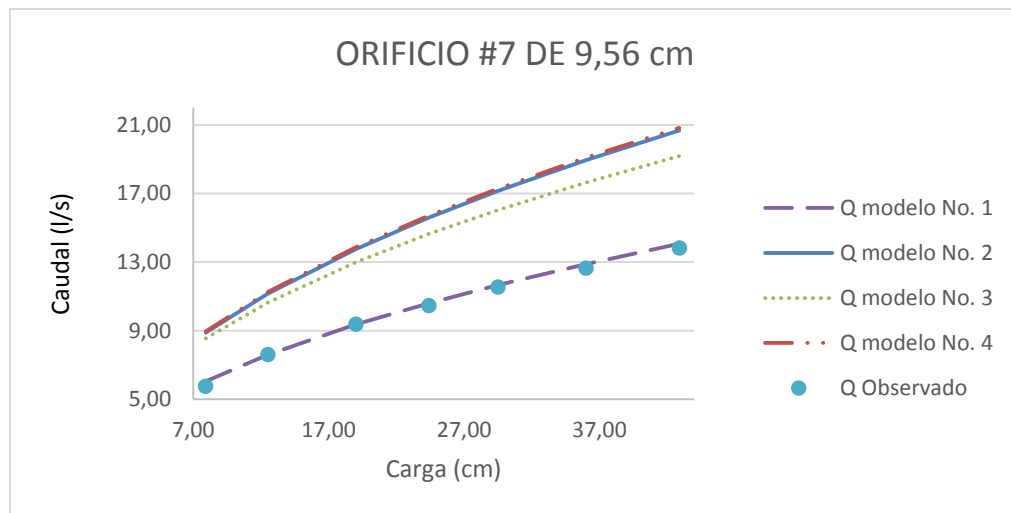
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 9,56 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
7.92	5,76	6,04	4,73	8,88	92,59	8,55	92,65	8,95	92,31
12.52	7,61	7,60	0,22	11,17	94,11	10,64	94,15	11,25	93,82
19.02	9,37	9,36	0,10	13,76	95,22	13,00	95,26	13,87	94,94
24.42	10,46	10,61	1,39	15,59	95,78	14,65	95,81	15,71	95,51
29.52	11,55	11,66	0,99	17,14	96,16	16,04	96,19	17,28	95,90
36.02	12,64	12,88	1,88	18,94	96,53	17,64	96,55	19,08	96,27
42.92	13,81	14,06	1,77	20,67	96,82	19,18	96,84	20,83	96,57

Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 9,56 cm de diámetro**



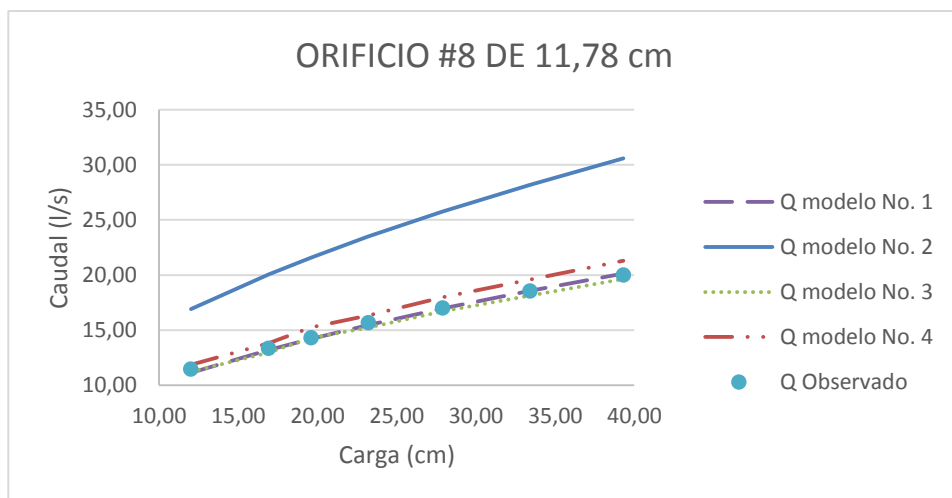
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 11,78 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
12.01	11,47	11,13	3,07	16,90	96,11	11,23	94,46	11,86	94,15
16.91	13,35	13,20	1,12	20,05	96,72	12,96	95,23	13,80	94,93
19.61	14,32	14,22	0,76	21,60	96,95	14,29	95,69	15,25	95,40
23.21	15,69	15,47	1,42	23,50	97,20	15,24	95,67	16,33	95,68
27.91	17,02	16,96	0,38	25,76	97,45	16,71	96,34	17,98	96,06
33.41	18,54	18,56	0,08	28,19	97,67	18,13	96,64	19,59	96,37
39.31	20,01	20,13	0,60	30,58	97,85	19,64	96,91	21,29	96,65

Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 11,78 cm de diámetro**



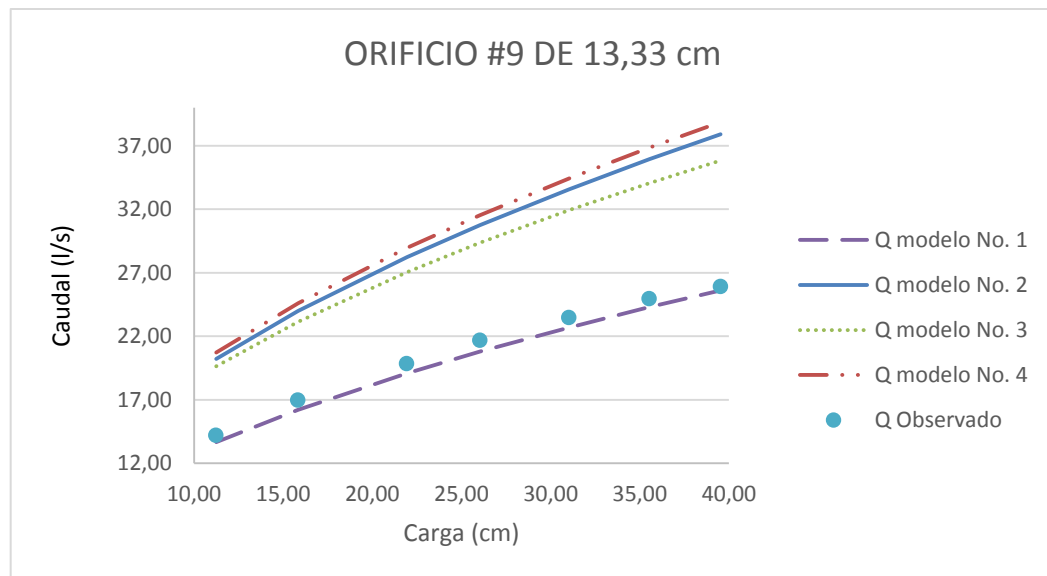
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. **Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 13,33 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
11.24	14,21	13,66	4,05	20,21	96,75	19,65	96,83	20,72	96,65
15.84	16,98	16,21	4,69	23,99	97,26	23,15	97,33	24,60	97,16
21.94	19,85	19,08	4,02	28,23	97,67	27,05	97,73	28,95	97,57
26.04	21,70	20,79	4,39	30,76	97,86	29,36	97,91	31,54	97,76
31.04	23,47	22,70	3,42	33,58	98,04	31,93	98,09	34,44	97,94
35.54	24,96	24,29	2,78	35,94	98,17	34,07	98,22	36,85	98,07
39.54	25,92	25,62	1,18	37,90	98,26	35,85	98,31	38,87	98,17

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 13,33 cm de diámetro**



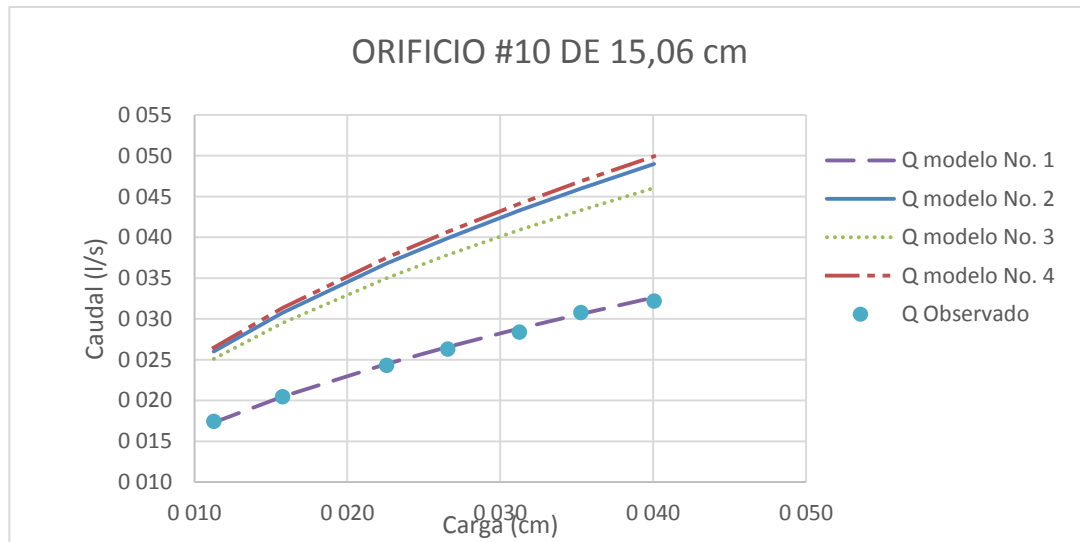
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIV. **Valores del gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 15,06 cm de diámetro**

Carga (cm)	Q Observado (l/s)	Q modelo 1 (l/s)	% de Error modelo 1	Q modelo 2 (l/s)	% de Error modelo 2	Q modelo 3 (l/s)	% de Error modelo 3	Q modelo 4 (l/s)	% de Error modelo 4
11,27	17,44	25,99	0,79	26,49	97,47	25,11	97,52	17,31	97,38
15,77	20,46	30,75	0,04	31,33	97,86	29,49	97,90	20,47	97,77
22,57	24,32	36,79	0,70	37,49	98,21	35,00	98,25	24,49	98,12
26,57	26,28	39,91	1,08	40,67	98,35	37,84	98,38	26,57	98,26
31,27	28,36	43,30	1,61	44,12	98,48	40,90	98,51	28,83	98,39
35,27	30,78	45,98	0,54	46,86	98,57	43,33	98,60	30,61	98,48
40,07	32,17	49,01	1,41	49,95	98,66	46,05	98,68	32,63	98,57

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Gráfico de los caudales generado y observado vs carga para el orificio de 15,06 cm de diámetro**



Fuente: elaboración propia.

3.5.4. Gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d

Se obtuvo experimentalmente el gráfico donde se muestra la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d en función del número de Reynolds.

Tabla LXV. **Valores del gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d**

Núm. de orificio	Carga (cm)	Velocidad (cm/s)	Área (cm ²)	Diámetro (cm)	Viscosidad (cm ² /s)	Núm. de Reynolds	C_c	C_v	C_d
1	11,75	151,83	7,55	3,10	0,07	6724,07	0,70	1,02	0,72
	16,45	179,65	7,55	3,10	0,07	7956,02	0,67	1,03	0,69
	21,95	207,52	7,55	3,10	0,07	9190,32	0,70	1,01	0,71
	25,35	223,02	7,55	3,10	0,07	9876,48	0,68	1,03	0,70

Continuación de la tabla LXV.

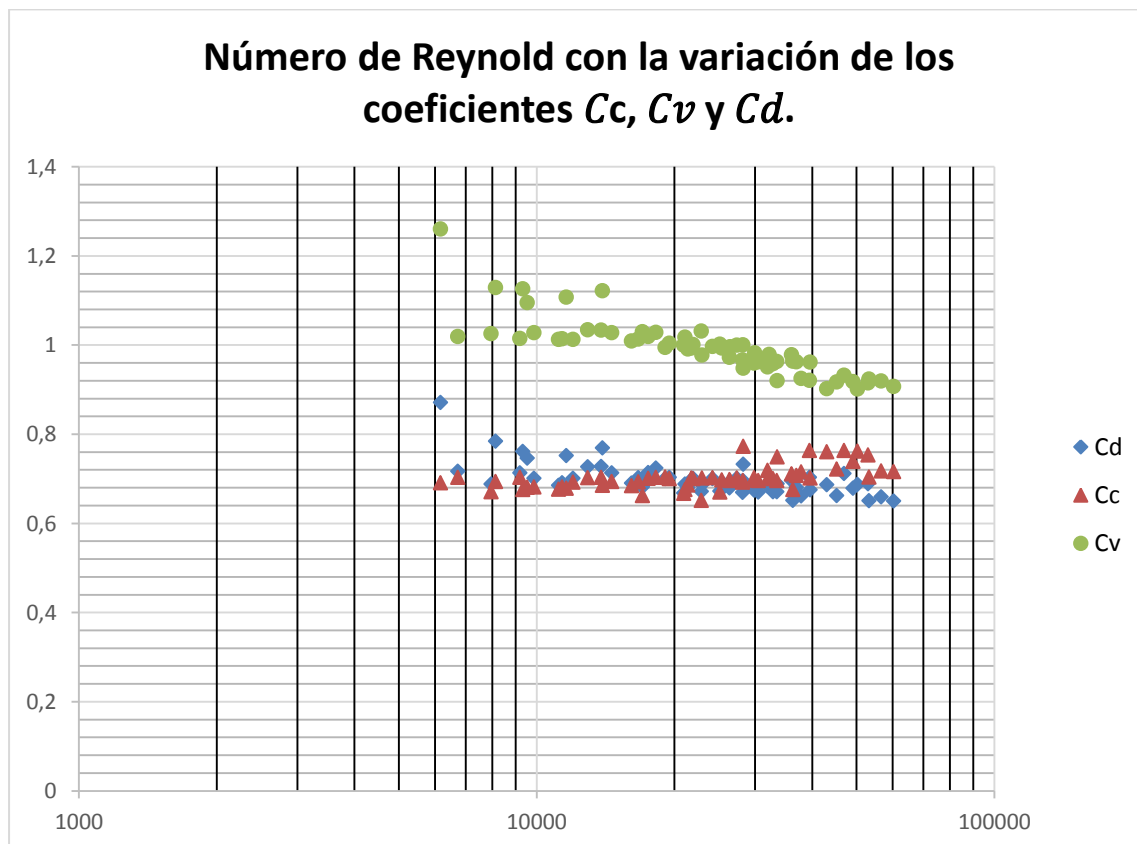
	32,45	252,32	7,55	3,10	0,07	11174,30	0,68	1,01	0,69
	33,65	256,95	7,55	3,10	0,07	11379,04	0,68	1,01	0,69
	37,45	271,07	7,55	3,10	0,07	12004,36	0,69	1,01	0,70
2	3,65	84,62	20,43	5,10	0,07	6165,50	0,69	1,26	0,87
	6,35	111,62	20,43	5,10	0,07	8132,21	0,69	1,13	0,78
	8,75	131,02	20,43	5,10	0,07	9546,09	0,68	1,10	0,75
	20,45	200,31	20,43	5,10	0,07	14593,80	0,69	1,03	0,71
	24,95	221,25	20,43	5,10	0,07	16119,70	0,68	1,01	0,69
	29,55	240,78	20,43	5,10	0,07	17542,86	0,70	1,02	0,71
	35,05	262,24	20,43	5,10	0,07	19105,82	0,70	0,99	0,70
3	5,99	108,41	28,46	6,02	0,07	9323,12	0,68	1,13	0,76
	9,29	135,01	28,46	6,02	0,07	11610,63	0,68	1,11	0,75
	13,19	160,87	28,46	6,02	0,07	13834,72	0,70	1,03	0,73
	30,29	243,78	28,46	6,02	0,07	20965,13	0,67	1,00	0,67
	30,69	245,38	28,46	6,02	0,07	21103,11	0,68	1,02	0,69
	36,19	266,47	28,46	6,02	0,07	22916,18	0,65	1,03	0,67
43,59	292,44	28,46	6,02	0,07	25150,20	0,67	1,00	0,67	
4	7,85	124,10	41,85	7,30	0,07	12942,23	0,70	1,03	0,73
	13,05	160,01	41,85	7,30	0,07	16687,05	0,69	1,01	0,70
	17,85	187,14	41,85	7,30	0,07	19516,12	0,70	1,00	0,70
	22,65	210,81	41,85	7,30	0,07	21984,09	0,70	1,00	0,70
	27,55	232,49	41,85	7,30	0,07	24245,72	0,70	1,00	0,70
	32,85	253,87	41,85	7,30	0,07	26475,37	0,70	1,00	0,69
37,35	270,70	41,85	7,30	0,07	28230,57	0,70	1,00	0,70	
5	6,91	116,44	55,15	8,38	0,07	13939,09	0,69	1,12	0,77
	11,81	152,22	55,15	8,38	0,07	18223,02	0,70	1,03	0,72
	16,91	182,15	55,15	8,38	0,07	21805,56	0,70	0,99	0,70
	22,91	212,01	55,15	8,38	0,07	25380,96	0,70	0,99	0,69
	26,71	228,92	55,15	8,38	0,07	27405,17	0,70	1,00	0,70
	31,91	250,21	55,15	8,38	0,07	29954,28	0,70	0,98	0,69
36,91	269,10	55,15	8,38	0,07	32215,69	0,70	0,98	0,69	
6	16,53	180,06	62,77	8,94	0,07	22996,39	0,70	0,98	0,69
	24,83	220,70	62,77	8,94	0,07	28186,01	0,69	0,97	0,67
	29,13	239,05	62,77	8,94	0,07	30529,66	0,70	0,96	0,67
	32,53	252,61	62,77	8,94	0,07	32262,47	0,71	0,97	0,69
	35,03	262,14	62,77	8,94	0,07	33479,43	0,70	0,96	0,67
	40,73	282,67	62,77	8,94	0,07	36101,02	0,71	0,98	0,70
42,73	289,53	62,77	8,94	0,07	36976,86	0,71	0,96	0,68	
7	7,92	124,66	71,78	9,56	0,07	17024,41	0,66	1,03	0,68
	12,52	156,73	71,78	9,56	0,07	21404,82	0,69	0,99	0,68
	19,02	193,18	71,78	9,56	0,07	26382,42	0,70	0,97	0,68
	24,42	218,89	71,78	9,56	0,07	29893,87	0,70	0,96	0,67
	29,52	240,66	71,78	9,56	0,07	32867,56	0,70	0,96	0,67
	36,02	265,84	71,78	9,56	0,07	36306,23	0,68	0,96	0,65
42,92	290,19	71,78	9,56	0,07	39631,38	0,70	0,96	0,68	
8	12,01	153,50	108,99	11,78	0,07	25831,86	0,71	0,97	0,68
	16,91	182,15	108,99	11,78	0,07	30653,24	0,70	0,97	0,67
	19,61	213,40	108,99	11,78	0,07	35912,17	0,71	0,93	0,67
	23,21	234,01	108,99	11,78	0,07	39380,54	0,70	0,94	0,66
	27,91	256,03	108,99	11,78	0,07	43086,19	0,70	0,93	0,66
	33,41	277,72	108,99	11,78	0,07	46736,31	0,70	0,93	0,66
39,31	196,15	108,99	11,78	0,07	33009,24	0,70	0,93	0,66	
9	11,24	148,47	139,56	13,33	0,07	28272,76	0,77	0,95	0,73
	15,84	176,26	139,56	13,33	0,07	33565,31	0,75	0,92	0,69
	21,94	207,45	139,56	13,33	0,07	39504,85	0,76	0,92	0,70
	26,04	226,01	139,56	13,33	0,07	43038,82	0,76	0,90	0,69

Continuación de la tabla LXV.

	31,04	246,76	139,56	13,33	0,07	46990,22	0,76	0,93	0,71
	35,54	264,04	139,56	13,33	0,07	50281,68	0,76	0,90	0,69
	39,54	278,51	139,56	13,33	0,07	53036,21	0,75	0,92	0,69
10	11,27	148,70	178,13	15,06	0,07	31991,78	0,72	0,95	0,68
	15,77	175,90	178,13	15,06	0,07	37843,59	0,72	0,93	0,66
	22,57	210,43	178,13	15,06	0,07	45273,31	0,72	0,92	0,66
	26,57	228,32	178,13	15,06	0,07	49121,57	0,74	0,92	0,68
	31,27	247,69	178,13	15,06	0,07	53289,34	0,70	0,92	0,65
	35,27	263,06	178,13	15,06	0,07	56595,14	0,72	0,92	0,66
	40,07	280,39	178,13	15,06	7,00E-02	60323	0,717	0,908	0,6505

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Gráfico del número de Reynolds con la variación de los coeficientes C_c , C_v y C_d**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se simuló el flujo a través de orificios circulares de pared delgada y pudo analizarse el flujo de agua de manera libre a la atmósfera. con una trayectoria parabólica hacia un punto por debajo de la altura del mismo; la distancia entre el punto y el orificio aumentaba acorde a la carga (y) generado por la velocidad del flujo en el sistema.
2. Al determinar el coeficiente de velocidad para cada uno de los ensayos realizados se confirma el fundamento teórico donde señala que el valor del coeficiente de velocidad será casi 1 al relacionar la velocidad teórica con la velocidad real obtenida con la implementación del tubo de Pitot en los ensayos de cada uno de los orificios. Sin embargo, en una obra hidráulica no es posible tener un tubo de Pitot, ni un vernier para medir el diámetro de contracción.
3. Al comparar la trayectoria de las curvas de los coeficientes de velocidad, contracción y descarga obtenida en los ensayos con los respectivos valores del número de Reynolds, figura 69, pudo constatarse que la tendencia de los ensayos es muy parecida a la figura 13; sin embargo, en muchas obras de derivación la velocidad en los orificios no generan valores de número de Reynolds tan pequeños. Mientras que en el equipo hidráulico ensayado es muy difícil utilizar velocidades muy grandes ya que esto dificulta el aforo volumétrico; es decir, no es del todo recomendable basarse en la figura 13.

4. Para el modelo 2 se involucra C_v y C_c dando como producto aproximado 0,70, lo cual está arriba del valor de 0,60.

5. Se empleó el *software* SPSS el cual generó dos modelos matemáticos: $Q = 0.001 * A_o * \sqrt{2g} * y^{0.478}$ y $Q = 0.001 * A_o * \sqrt{2gy}$; ambos modelos relacionan el caudal con la carga para cada uno de los orificios ensayados. Pero los porcentajes de error respecto del caudal real observado son grandes.

6. Al comparar las gráficas de los caudales generados por los 4 modelos se observa que el modelo 1 $Q = 0,7942 * D^{-0,072} * A_o * \sqrt{2gH}$, presenta menor porcentaje de error, en dicho modelo el C_d está en función del diámetro; por lo tanto en la práctica es más conveniente usar esta fórmula porque no incluye a los coeficientes de contracción y de velocidad los cuales son complicados de determinar en un orificio instalado en una obra hidráulica puesto que los C_c y C_v varían con el tirante de agua.

RECOMENDACIONES

1. Para realizar el ensayo de orificios de pared delgada debe preverse del buen estado del equipo hidráulico; también, la limpieza adecuada antes y después de su utilización para tener mejor precisión en los resultados obtenidos en los ensayos.
2. Velar por un adecuado orden en el procedimiento de los ensayos, de lo contrario, podría averiarse el equipo de ensayo.
3. En el proceso de instalación de las placas metálicas con los orificios verificar que la placa quede correctamente adherida al canal y que no quede fuga alguna de caudal pues esto hace que los datos no sean los correctos.
4. Es necesario biselar el perímetro de los orificios para así garantizar que el flujo sobre las mismas sea libre y no presenten escurrimientos o ahogamientos en sus paredes ya que esto da lugar al caso de descarga ahogada.
5. Tanto para el aforo volumétrico como para el ensayo en general debe contarse con dos personas o más para su realización ya que es imposible poder maniobrar el equipo y generar la toma de datos a la vez por una sola persona.
6. Al proceder a tomar lecturas de carga es necesario que el flujo en el canal se estabilice, se aconseja tomar datos del tirante mayor al menor,

cuidando en esta última parte que el flujo al final del canal presente una salida con forma de tiro parabólico, sin presentar escurrimientos. Para cada toma se debe esperar el tiempo necesario para que el nivel del flujo se estabilice después de regular la válvula, el cual depende del ángulo de abertura en cada vertedero.

7. Al hacer uso del sistema de bombeo que suministra agua al canal se deben revisar los niveles del tanque cisterna para que la bomba no presente cavitación y prolongue el proceso de estabilización del caudal e incluso pueda apagarse, provocando el tener que repetir todo el proceso de aforo.
8. Considerar que las placas tengan un calibre de 3 milímetros, para evitar el flexionamiento debido a la fuerza hidrostática ejercida por la carga de agua.
9. Las estructuras hidráulicas de las placas las que se trabajaron en esta investigación se recomiendan como opción de diseño y empleo, por presentar facilidad de construcción.

BIBLIOGRAFÍA

1. GARCÍA VÁSQUEZ, A. F. *Ecuación Vol (h) para tanque volumétrico del Laboratorio de Hidráulica*. Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015.
2. GILES, Randal. V.. *Mecánica de fluidos e hidráulica*. México: McGraw-Hill, 1994. 281 p.
3. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. México: Oxford University Press, 2005. 345 p.
4. MERRIT, Frederick. S. *Manual del ingeniero civil*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1998. 806 p.
5. MOTT, Robert. L. *Mecánica de fluidos*. 7a ed. México: Pearson Educación, 2015. 515 p.
6. RODRÍGUEZ DÍAZ, Hector Alfonso. *Hidráulica experimental*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. 359 p.
7. _____. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 412 p.
8. SOTELO AVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. México: Limusa, 1999. 286 p.

9. STREETER, Victor. L. y WYKE, Benjamin. *Mecánica de los fluidos*. 8a ed. México: McGraw-Hill, 1999. 142 p.