



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

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE  
DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**Ghelber Isaac Ramírez Velásquez**

Asesorado por el Ing. Luis Eduardo Portillo España

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE  
DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**GHELBER ISAAC RAMÍREZ VELÁSQUEZ**  
ASESORADO POR EL ING. LUIS EDUARDO PORTILLO ESPAÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

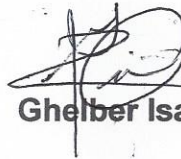
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alan Giovani Cosillo Pinto
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Fredy Adolfo Alvarado Hernández
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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 VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 12 de octubre de 2016.



**Gheiber Isaac Ramírez Velásquez**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 20 de Julio de 2018

Msc. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Facultad de Ingeniería  
Estimado ingeniero:

Espero tenga éxito en sus labores diarias. Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Ghelber Isaac Ramírez Velásquez, quien se identifica con Registro Académico 2012-32000 y CUI No. 2333 55049 1202, titulado ***CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA*** 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 Eduardo Portillo España

Colegiado No. 11697

**LUIS E. PORTILLO ESPAÑA**  
**INGENIERO CIVIL**  
Colegiado No. 11697



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala, 23 de Julio de 2018

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **"CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Ghelber Isaac Ramírez Velásquez, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Eduardo Portillo España.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica



*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 Eduardo Portillo España y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Ghelber Isaac Ramírez Velásquez **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUÍDOS**, DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

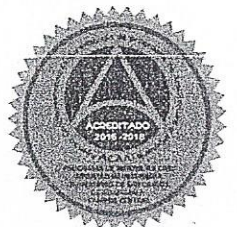
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
DIRECTOR  
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, mayo 2019

/mmm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.254-2019

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 del trabajo de graduación titulado: **"CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS CIRCULARES DE PARED DELGADA DE DIÁMETRO VARIABLE, EN LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"** presentado por el estudiante: **Ghelber Isaac Ramírez Velásquez** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/echm





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, y ser la fuente de sabiduría para alcanzar esta meta.
- Mis padres** Francisco Ramírez y Thelma Velásquez, por el esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional que emplearon en mí, para que sea una persona de éxito.
- Mis abuelos** Eulalio Ramírez (q. e. p. d.), Sabina López (q. e. p. d.), Margarito Velásquez (q. e. p. d.), Gumercinda Fuentes, con inmenso cariño.
- Mis hermanos** Josué Chilel, José y Leydi Ramírez, por su apoyo incondicional en todo momento.
- Mis tíos y primos** Con aprecio.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por concederme la bendición de alcanzar una meta más en mi vida. Sin Él nada es posible.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de convertirme en un profesional al servicio de Guatemala.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Luis Eduardo Portillo España, por brindarme su apoyo, sus conocimientos y su asesoría en la elaboración de esta investigación.
<b>Mis maestros</b>	Por inculcarme el conocimiento que permitió alcanzar esta meta. Especialmente al Prof. Gustavo González y a la Profa. Gloria Ramírez.
<b>Dr. Luis Manuel Sandoval</b>	Por el apoyo brindado y la valiosa aportación de sus conocimientos en esta investigación.
<b>David Girardot Pazmiño</b>	Por su valiosa amistad, su apoyo y sus conocimientos brindados que me permitieron crecer como persona y profesional.
<b>Vivian Nohemí Orozco</b>	Por su cariño y apoyo incondicional demostrado, motivándome a ser mejor cada día.

**Marco Antonio  
Navarro**

Por su valiosa amistad y colaboración prestada en la realización de este trabajo de graduación. Mis mejores deseos.

**Pablo Estuardo  
Medrano**

Por su valiosa amistad y apoyo brindado a través de los años.

**Mis amigos**

A todos los que de una u otra forma contribuyeron para que yo alcanzara este triunfo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVII
GLOSARIO .....	XIX
RESUMEN .....	XXI
OBJETIVOS .....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	1
1.1. Hidrometría .....	1
1.1.1. Definición .....	1
1.2. Importancia de la medición de caudales .....	2
1.3. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos .....	2
1.3.1. Método volumétrico .....	3
1.3.2. Método químico .....	4
1.3.3. Método velocidad-superficie .....	5
1.3.3.1. Aforos con molinetes .....	6
1.3.3.2. Aforos con flotadores .....	10
1.3.4. Canal Parshall .....	13
2. VERTEDEROS .....	15
2.1. Definición de vertedero .....	15
2.1.1. Terminología .....	17
2.2. Clasificación de los vertederos .....	18
2.2.1. Clasificación de los vertederos por su forma geométrica .....	18

2.2.2.	Clasificación de los vertederos según la altura de la lámina de agua, aguas abajo.....	19
2.2.3.	Clasificación de los vertederos según el espesor de pared.....	21
2.2.4.	Clasificación de los vertederos según la longitud de la cresta .....	22
2.3.	Vertederos de pared delgada .....	23
2.4.	Secciones típicas .....	24
2.4.1.	Vertedero rectangular sin contracciones.....	25
2.4.2.	Vertedero rectangular con contracciones.....	26
2.4.3.	Vertedero triangular .....	27
2.4.4.	Vertedero trapezoidal tipo Cipolletti .....	29
2.5.	Vertederos circulares.....	30
2.6.	Instalación de vertederos.....	31
2.7.	Dimensión de vertederos.....	32
2.8.	Características y principios de funcionamiento en vertederos circulares .....	33
2.8.1.	Ventajas de los vertederos circulares .....	33
2.8.2.	Desventajas de los vertederos circulares.....	34
2.8.3.	Principios de funcionamiento de los vertederos circulares.....	34
2.9.	Fórmula teórica para calcular caudales en vertederos circulares.....	34
2.9.1.	Ecuación de Staus – Von Sanden.....	34
2.9.2.	Ecuación de patronamiento propuesta por Azevedo y Acosta .....	42
2.10.	Fórmula experimental para calcular caudales en vertederos circulares.....	42
2.10.1.	Ecuación potencial.....	43

3.	ENSAYOS DE VERTEDEROS CIRCULARES .....	47
3.1.	Especificaciones técnicas de instalación de vertederos .....	47
3.2.	Diseño y elaboración de vertederos circulares.....	51
3.3.	Calibración de los vertederos circulares de distinto diámetro ..	53
3.3.1.	Ensayo para vertederos circulares de pared delgada .....	55
3.3.2.	Calibración de vertedero circular de diámetro 44 cm .....	57
3.3.2.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 44 cm.....	62
3.3.2.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta, con diámetro de 44 cm.....	65
3.3.3.	Calibración de vertedero circular de diámetro 40 cm .....	69
3.3.3.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro 40 cm.....	73
3.3.3.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 40 cm.....	75
3.3.4.	Calibración de vertedero circular de diámetro 35 cm .....	78
3.3.4.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 35 cm.....	82

3.3.4.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 35 cm.....	84
3.3.5.	Calibración de vertedero circular de diámetro 30 cm .....	87
3.3.5.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 30 cm.....	91
3.3.5.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 30 cm.....	93
3.3.6.	Calibración de vertedero circular de diámetro 25 cm .....	95
3.3.6.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 25 cm.....	99
3.3.6.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 25 cm.....	101
3.3.7.	Calibración de vertedero circular de diámetro 20 cm .....	104
3.3.7.1.	Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 20 cm.....	108
3.3.7.2.	Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 20 cm.....	110
3.4.	Obtención de fórmula experimental general .....	112

3.4.1.	Obtención de fórmula experimental general a partir de la ecuación Staus – Von Sanden .....	113
3.4.2.	Obtención de fórmula experimental general a partir de la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta .....	115
3.5.	Comparación de caudales observados y teóricos experimentales a partir de la ecuación Staus – Von Sanden.	117
3.5.1.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm .....	117
3.5.2.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm .....	118
3.5.3.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 40 cm .....	119
3.5.4.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 35 cm .....	120
3.5.5.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 30 cm .....	121
3.5.6.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 25 cm .....	122
3.5.7.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 20 cm .....	123



3.6.	Comparación de caudales observados y teóricos experimentales a partir de la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta .....	124
3.6.1.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm .....	125
3.6.2.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 40 cm .....	126
3.6.3.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 35 cm .....	127
3.6.4.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 30 cm .....	128
3.6.5.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 25 cm .....	129
3.6.6.	Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 20 cm .....	130
3.7.	Obtención de modelo matemático con SPSS .....	131
3.7.1.	Definición de la ecuación con SPSS Statistics 23	132
3.7.2.	Comparación de caudales observados y caudales teóricos generados con SPSS .....	137
3.7.2.1.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 44 cm.....	137

3.7.2.2.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 40 cm.....	138
3.7.2.3.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 35 cm.....	139
3.7.2.4.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 30 cm.....	140
3.7.2.5.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 25 cm.....	141
3.7.2.6.	Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 20 cm.....	142
CONCLUSIONES.....		145
RECOMENDACIONES.....		147
BIBLIOGRAFÍA.....		149



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Método volumétrico.....	3
2.	Método químico .....	4
3.	Molinete de hélice .....	6
4.	Molinete de tasa cónica .....	7
5.	División de sección de aforo con molinete .....	9
6.	Aforo con flotadores.....	13
7.	Canal Parshall.....	14
8.	Vertederos usados para medición de caudales .....	16
9.	Vertedero usado para control del nivel del flujo .....	16
10.	Vista frontal de un vertedero rectangular y sus partes.....	17
11.	Perfil de un vertedero en funcionamiento.....	18
12.	Diferentes formas de vertederos .....	19
13.	Vertedero de descarga libre .....	20
14.	Vertedero sumergido .....	20
15.	Vertedero de pared delgada .....	21
16.	Vertedero de pared gruesa.....	22
17.	Vertedero sin contracciones laterales .....	22
18.	Vertedero con contracciones laterales .....	23
19.	Perfil vertedero de pared delgada .....	24
20.	Vertedero rectangular sin contracciones .....	26
21.	Vertedero rectangular con contracciones.....	27
22.	Vertedero triangular .....	28
23.	Vertedero trapezoidal tipo Cipolletti.....	30

24.	Vertedero circular .....	31
25.	Aspecto real del flujo en un vertedero .....	35
26.	Aspecto idealizado del flujo en un vertedero.....	35
27.	Análisis de flujo en un vertedero circular.....	37
28.	Regresión lineal a un conjunto de puntos .....	44
29.	Canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería .....	47
30.	Dimensiones del canal.....	48
31.	Instalación de vertedero .....	49
32.	Vertedero instalado con la pared perpendicular a la corriente y bordes impermeabilizados.....	50
33.	Zona aireada bajo la lámina vertiente .....	50
34.	Proceso de trazado y corte de vertedero circular.....	51
35.	Detalle de instalación de vertedero circular .....	52
36.	Dimensiones de vertederos de diámetro 44 cm y 40 cm .....	52
37.	Dimensiones de vertederos de diámetro 35 cm y 30 cm .....	53
38.	Dimensiones de vertederos de diámetro 25 cm y 20 cm .....	53
39.	Pozo tranquilizador con limnómetro .....	54
40.	Depósito calibrado .....	54
41.	Realización de ensayos.....	56
42.	Medición del volumen en el depósito calibrado.....	56
43.	Sistema de bombeo.....	57
44.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 44 cm .....	60
45.	Curva de calibración, con diámetro de 44 cm .....	61
46.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 44 cm ...	64
47.	Determinación del coeficiente de descarga con diámetro de 44 cm, ...	67
48.	Comparación de caudales, con diámetro de 44 cm .....	69
49.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 40 cm .....	71

50.	Curva de calibración, con diámetro de 40 cm .....	73
51.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 40 cm....	74
52.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 40 cm....	76
53.	Comparación de caudales, con diámetro de 40 cm .....	78
54.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 35 cm .....	80
55.	Curva de calibración, con diámetro de 35 cm .....	82
56.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 35 cm....	83
57.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 35 cm....	85
58.	Comparación de caudales, con diámetro de 35 cm .....	87
59.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 30 cm .....	89
60.	Curva de calibración, con diámetro de 30 cm .....	90
61.	Determinación del coeficiente de descarga con diámetro de 30 cm....	91
62.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 30 cm....	93
63.	Comparación de caudales, con diámetro de 30 cm .....	95
64.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 25 cm .....	97
65.	Curva de calibración, con diámetro de 25 cm .....	99
66.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 25 cm..	100
67.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 25 cm..	102
68.	Comparación de caudales con diámetro de 25 cm .....	104
69.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 20 cm .....	106
70.	Curva de calibración con diámetro de 20 cm .....	107
71.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 20 cm..	108
72.	Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 20 cm..	110
73.	Comparación de caudales con diámetro de 20 cm .....	112
74.	Base contra coeficientes de descarga Cd .....	114

75.	Base contra coeficientes de descarga Cd.....	116
76.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	118
77.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	119
78.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	120
79.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	121
80.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	122
81.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	123
82.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	124
83.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	126
84.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	127
85.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	128
86.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	130
87.	Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general .....	131
88.	SPSS, programa estadístico informático, 1.....	132
89.	SPSS, programa estadístico informático, 2.....	133
90.	SPSS, programa estadístico informático, 3.....	134
91.	Definición de la ecuación en SPSS.....	135

92.	Parámetros en SPSS.....	136
93.	Estimación de parámetros en SPSS .....	136
94.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	138
95.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	139
96.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	140
97.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	141
98.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	142
99.	Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS .....	143

## TABLAS

I.	Valores de $\phi$ para vertederos circulares de pared delgada.....	41
II.	Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 44 cm.....	57
III.	Caudales observados con vertedero circular de diámetro 44 cm .....	58
IV.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 44 cm .....	59
V.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración, con diámetro de 44 cm .....	61
VI.	Caudales observados y teóricos, con diámetro de 44 cm.....	63
VII.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos, con diámetro de 44 cm .....	65
VIII.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 44 cm.....	66
IX.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 44 cm .....	68
X.	Comparación de caudales con diámetro de 44 cm .....	68
XI.	Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 40 cm.....	69
XII.	Caudales observados con vertedero circular de diámetro 40 cm .....	70
XIII.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 40 cm .....	70



XIV.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 40 cm .....	72
XV.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 40 cm .....	73
XVI.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 40 cm .....	75
XVII.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 40 cm .....	76
XVIII.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 40 cm .....	77
XIX.	Comparación de caudales, con diámetro de 40 cm .....	77
XX.	Datos obtenidos con vertedero circular con diámetro de 35 cm .....	78
XXI.	Caudales observados con vertedero circular con de diámetro 35 cm ..	79
XXII.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con de diámetro de 35 cm .....	79
XXIII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 35 cm .....	81
XXIV.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 35 cm .....	82
XXV.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 35 cm .....	84
XXVI.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 35 cm .....	85
XXVII.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 35 cm .....	86
XXVIII.	Comparación de caudales, con diámetro de 35 cm .....	86
XXIX.	Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 30 cm .....	87
XXX.	Caudales observados con vertedero circular de diámetro 30 cm .....	88
XXXI.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 30 cm .....	88
XXXII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 30 cm .....	90
XXXIII.	Caudales observados y teóricos, con diámetro de 30 cm .....	91

XXXIV.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 30 cm .....	92
XXXV.	Caudales observados y teóricos, con diámetro de 30 cm.....	93
XXXVI.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 30 cm .....	94
XXXVII.	Comparación de caudales con diámetro de 30 cm .....	95
XXXVIII.	Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 25 cm .....	96
XXXIX.	Caudales observados con vertedero circular de diámetro 25 cm .....	96
XL.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 25 cm .....	97
XLI.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 25 cm .....	98
XLII.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 25 cm.....	99
XLIII.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 25 cm .....	101
XLIV.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 25 cm.....	101
XLV.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 25 cm .....	103
XLVI.	Comparación de caudales con diámetro de 25 cm .....	103
XLVII.	Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 20 cm .....	104
XLVIII.	Caudales observados con vertedero circular de diámetro 20 cm .....	105
XLIX.	Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 20 cm .....	105
L.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 20 cm .....	107
LI.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 20 cm.....	108
LII.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 20 cm .....	109
LIII.	Caudales observados y teóricos con diámetro de 20 cm.....	110

LIV.	Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 20 cm .....	111
LV.	Comparación de caudales con diámetro de 20 cm .....	112
LVI.	Diámetro de vertedero contra coeficiente de descarga $C_d$ .....	113
LVII.	Diámetro de vertedero contra coeficiente de descarga $C_d$ .....	115
LVIII.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	118
LIX.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	119
LX.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	120
LXI.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	121
LXII.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	122
LXIII.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	123
LXIV.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	124
LXV.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	125
LXVI.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	126
LXVII.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	127
LXVIII.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	128
LXIX.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	129
LXX.	Caudal real y generado con ecuación experimental general .....	130
LXXI.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	137
LXXII.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	138
LXXIII.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	139
LXXIV.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	140
LXXV.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	141
LXXVI.	Caudal real y caudal generado con SPSS .....	142

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H</b>	Altura de carga sobre el vertedero
<b>B</b>	Ancho del canal de llegada al vertedero
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo Theta
<b>D</b>	Diámetro del vertedero
<b>Q</b>	Caudal o gasto
<b>K</b>	Coefficiente
<b>Cd</b>	Coefficiente de descarga
<b>dA</b>	Diferencial de área
<b>dQ</b>	Diferencial de caudal
<b>L</b>	Distancia mínima, aguas arriba del vertedero
<b>Ec.</b>	Ecuación
<b>N</b>	Exponente
<b>g</b>	Gravedad, para este caso 9,81 m/s <sup>2</sup>
<b>l</b>	Litros
<b>Y</b>	Peso específico
<b>s</b>	Segundo
<b>Vo</b>	Velocidad de aproximación del flujo, medida en una sección aguas arriba del vertedero
<b>V</b>	Volumen



## GLOSARIO

<b>Aforo</b>	Conjunto de operaciones para determinar el caudal en un curso de agua para un nivel observado.
<b>Bisel</b>	Corte oblicuo en el borde de una superficie.
<b>Canal</b>	Es un conducto en el cual el líquido fluye con una superficie libre.
<b>Caudal</b>	También denominado gasto. Se define como el volumen de agua que pasa por la sección transversal del cauce por unidad de tiempo, y se expresa en m <sup>3</sup> /s o l/s.
<b>Corriente</b>	Movimiento de traslación de un fluido en una dirección determinada.
<b>Fluido</b>	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzos de corte.
<b>Flujo</b>	Movimiento de un fluido que atraviesa una sección transversal.
<b>Sedimentos</b>	Material sólido que es transportado por una corriente de agua y se posa en el fondo de los ríos o canales.

**SPSS**

Programa estadístico informático.

## RESUMEN

Para medir caudales en canales y ríos se han inventado distintos métodos y dispositivos con la finalidad de generar resultados confiables, entre los dispositivos se encuentran los vertederos de sección circular. Sin embargo, no se cuenta con ecuaciones características para diferentes diámetros de vertederos y las ecuaciones presentadas en libros de texto desprecian parámetros importantes.

El presente trabajo de graduación se centra en determinar si los caudales generados con las ecuaciones teóricas para determinar caudales en vertederos circulares de pared delgada, dadas en los libros de texto, generan valores confiables. Para lograrlo se realizaron ensayos en laboratorio para luego analizar los resultados, los cuales permitieron obtener coeficientes de descarga para diferentes diámetros de vertedero, calibrar las ecuaciones teóricas y obtener nuevos modelos matemáticos que generen resultados confiables.

En el capítulo uno se presenta una breve explicación de la importancia de la medición de caudales, y de los instrumentos y métodos utilizados para dicho propósito.

El capítulo dos se encuentra dedicado a los vertederos, su clasificación y secciones comunes. Se profundiza especialmente en los vertederos de sección circular, sus características y principios de funcionamiento así como la deducción de ecuaciones teóricas presentadas en los libros de texto y el procedimiento para obtener la fórmula experimental.



En el capítulo tres se presenta la calibración de los vertederos circulares de pared delgada mediante aforos volumétricos, en donde se varía el diámetro y las alturas de carga. Se comparan los resultados con los obtenidos de las ecuaciones teóricas y se obtienen coeficientes de descarga que permitan obtener ecuaciones experimentales que presenten resultados con mayor precisión. El procesamiento de datos se realiza empleando los programas informáticos Excel y SPSS.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Calibrar ecuaciones para diferentes diámetros de vertederos circulares de pared delgada mediante ensayos de laboratorio.

### **Específicos**

1. Construir vertederos tipo circulares, con diámetro variable, y estudiarlos experimentalmente como estructuras hidráulicas concebidas para el control de niveles y medición de caudales.
2. Comparar los caudales obtenidos en las ecuaciones teóricas, con los obtenidos de forma experimental, mediante ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.
3. Determinar un coeficiente de descarga, para las formulas teóricas dadas en los textos, a fin de involucrar el efecto de viscosidad y contracción, obteniendo los caudales reales partiendo de las ecuaciones teóricas.
4. Comprobar si el coeficiente de descarga permanece en un rango aceptable para los distintos diámetros.
5. Determinar ecuaciones experimentales para la descarga de cada uno de los vertederos ensayados.

6. Elaborar una fuente de consulta, para así fortalecer el área investigativa del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería

## INTRODUCCIÓN

Un vertedero es un dique o pared que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida. El vertedero intercepta la corriente, causando una elevación del nivel aguas arriba, y se emplea para controlar niveles (vertederos de rebose) o para medir caudales (vertederos de medida).

El uso frecuente de los vertederos de pared delgada, como aforadores, se debe a que son estructuras de fácil construcción, y principalmente, por la facilidad de determinar, con bastante aproximación, el caudal del flujo en un canal a partir de la carga sobre el vertedero. El caudal en un vertedero está en función de la variable  $H$ , la cual representa el tirante de agua medida desde la cresta del vertedero.

Considerando la importancia de conocer los caudales que circulan en un canal de conducción sea prismático o cauce natural, se deben utilizar métodos precisos para realizar los aforos; por lo cual este trabajo se enfoca específicamente en la calibración de vertederos circulares de pared delgada, que es parte de la investigación de hidrometría que se viene realizando hace tiempo en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería, ensayando para distintos diámetros de vertederos circulares, para luego analizar los resultados y compararlos con las ecuaciones deducidas teóricamente por distintos autores y calibrarlas para determinar el caudal en función de la altura del tirante de agua.



# **1. ANTECEDENTES GENERALES**

## **1.1. Hidrometría**

A continuación, se describe la definición de la hidrometría.

### **1.1.1. Definición**

La hidrometría forma parte de la hidráulica como la rama que se encarga de la medición y el análisis de la cantidad de agua, que pasa a través de una sección transversal, debido a una conducción por gravedad como los canales abiertos y ríos; o a una conducción forzada a través de presión como los sistemas de tuberías de conducción a sección llena; esta medición se realiza en unidad de volumen por unidad de tiempo y es llamada caudal; a la medición del caudal se le llama aforo.

Las mediciones en la hidrometría se realizan con el propósito de establecer la cantidad de agua proporcionada por una fuente, como nacimientos de agua, tanques de distribución, plantas de tratamiento; y con el propósito de determinar la eficiencia de distribución del fluido en diferentes sistemas de distribución y obras civiles como sistemas de riego, sistemas de distribución de agua urbanos o industriales. La hidrometría busca proporcionar información veraz para establecer una buena eficiencia, manejo y control del flujo de agua.

## **1.2. Importancia de la medición de caudales**

Conocer el caudal que pasa a través de una sección permite determinar la cantidad de flujo que se dispone en un sistema hidráulico, canal o cuerpo de agua, y a partir de esto se puede lograr un manejo eficiente del flujo, manipulando correctamente la información proporcionada por las mediciones, para elaborar registros estadísticos que conlleven a pronósticos de disponibilidad, balances hídricos, planes de distribución y un monitoreo que verifique los resultados de estas acciones.

De esta manera se pueden optimizar sistemas de distribución, lo cual significa un ahorro de recursos, que pueden ser necesitados en tiempos de escases o pueden ser destinados a cubrir otras necesidades.

## **1.3. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos**

Para la medición de caudales en canales abiertos se utilizan varios métodos, los cuales varían en precisión, costos, velocidad de medición y poseen mayor efectividad para ciertas condiciones; por lo cual es necesario conocer aspectos como el tipo de flujo a medir, las condiciones en las que se medirá la sección, la precisión deseada, el presupuesto y otros aspectos que permitan determinar el mejor instrumento que satisfaga las exigencias. Dentro de los principales se encuentran:

- Método volumétrico
- Método químico
- Método velocidad-superficie
- Canal parshall
- Vertederos

### 1.3.1. Método volumétrico

Consiste en coleccionar el agua que circula por el canal abierto, con un recipiente de volumen conocido y tomar el tiempo que toma realizar esta acción. El caudal estará dado por la relación entre el volumen y el tiempo de recolección.

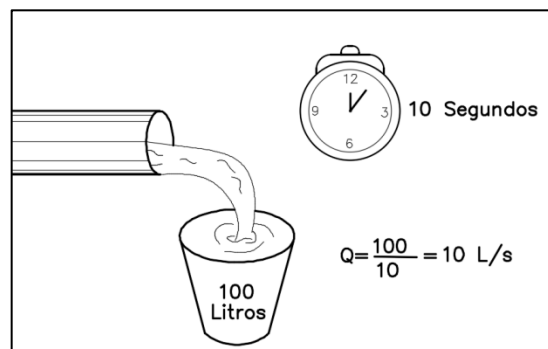
$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

- Q: caudal (l/s)
- V: volumen (l)
- t: tiempo (s)

Es recomendado para aforar caudales muy pequeños y su precisión dependerá de la persona que realice el aforo.

Figura 1. Método volumétrico



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

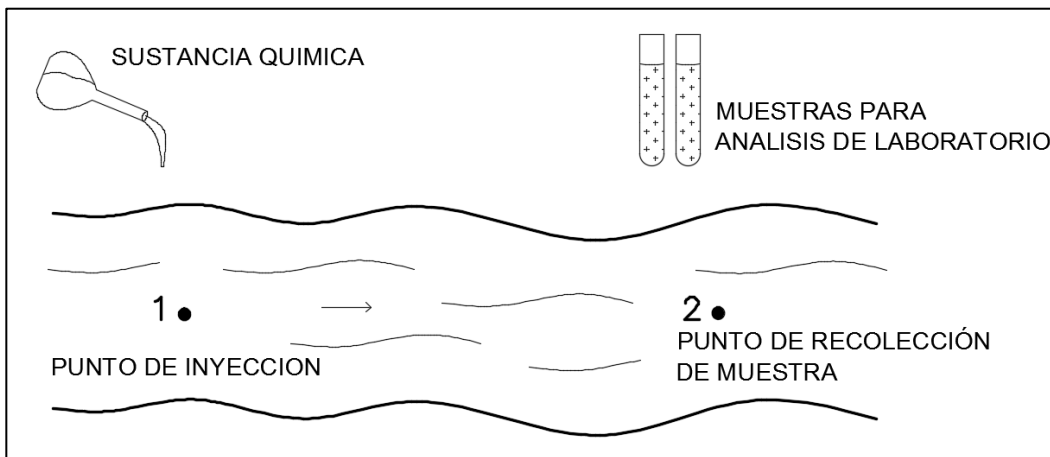


### 1.3.2. Método químico

En este método se utiliza una sustancia química en una proporción conocida, la cual es vertida en la corriente de agua, luego se debe tomar una muestra para determinar la cantidad de la sustancia presente, en una sección situada a una distancia considerable del punto de donde fue vertida para garantizar la mezcla de la sustancia y el agua. La determinación de la concentración de la sustancia en el agua se realiza mediante un análisis de laboratorio.

Esta técnica es usada principalmente en cuerpos de agua que presentan dificultades para aplicar otros métodos, como corrientes torrenciales o muy anchas. Las sustancias comúnmente usadas son la sal común y el dicromato de sodio.

Figura 2. Método químico



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

### 1.3.3. Método velocidad-superficie

Este método consiste en dividir la sección del río para luego determinar la velocidad promedio de la corriente en cada una de estas subsecciones, posteriormente utilizando la ecuación de continuidad se puede determinar el caudal de cada subsección; por lo que el caudal total será la sumatoria de cada caudal en las subsecciones.

$$Q_i = V_i * A_i$$

Donde:

- $Q_i$ : caudal de la subsección ( $m^3/s$ )
- $V_i$ : velocidad de la subsección ( $m/s$ )
- $A_i$ : área de la subsección ( $m^2$ )

El caudal total para la sección viene dado por:

$$Q_T = \sum Q_i$$

Donde:

- $Q_T$ : caudal total ( $m^3/s$ )
- $Q_i$ : caudal de la subsección ( $m^3/s$ )

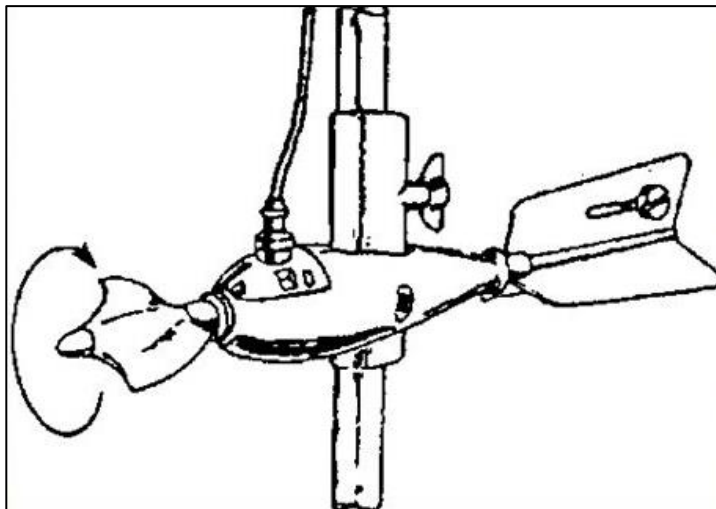
Para realizar la medición de la velocidad se utilizan comúnmente los siguientes dispositivos: flotador y reloj, molinete.

### 1.3.3.1. Aforos con molinetes

Los molinetes son instrumentos dotados de paletas o hélices móviles, las cuales son impulsadas por la corriente, obteniendo así un número de revoluciones las cuales son proporcionales a la velocidad.

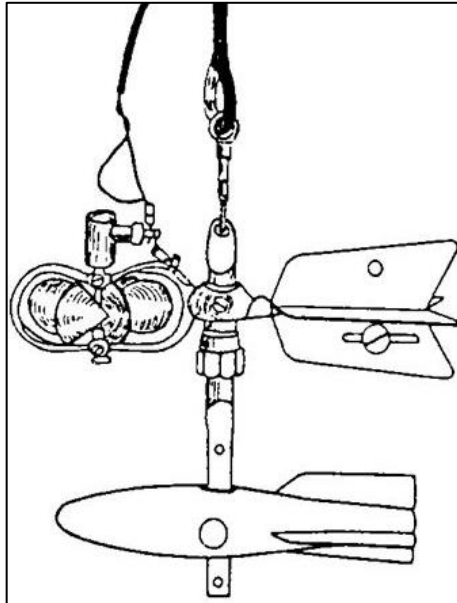
Pueden ser montados sobre una varilla, para aforos en corrientes superficiales, o pueden ser suspendidos desde un cable para realizar aforos en corrientes profundas. Cada molinete cuenta con una ecuación característica que relaciona la velocidad angular de las hélices con la velocidad de la corriente.

Figura 3. Molinete de hélice



Fuente: SlidePlayer. *Presentaciones gratis*. [www.slideplayer.es](http://www.slideplayer.es). Consulta: 18 de diciembre de 2016.

Figura 4. **Molinete de tasa cónica**



Fuente: SlidePlayer. *Presentaciones gratis*. [www.slideplayer.es](http://www.slideplayer.es). Consulta: 18 de diciembre de 2016.

Para realizar la medición es conveniente realizar los siguientes procedimientos:

- Elegir una sección transversal a la cual se le realizará un levantamiento topográfico, que permitirá conocer el área transversal; puede realizarse con cinta métrica o equipo de topografía dependiendo de la complejidad de la sección.
- Dividir la sección escogida en tramos iguales; el ancho de los tramos no debe ser mayor que  $1/15$  a  $1/20$  del ancho total de la sección.

- En cada vertical de los tramos de la sección, medir la velocidad con el molinete a cada 0,2, y 0,8 de la profundidad total. Si la profundidad de la vertical es menor a 0,6 m, se medirá una sola velocidad a 0,6 de la profundidad.
- Cada vertical en donde fue medida la velocidad, posee su área de influencia, la cual está delimitada por los extremos de cada tramo de la sección, por lo que se conoce el tirante inicial  $y_i$ , y el tirante final  $y_{i+1}$  del área de influencia  $A_i$ , y es necesario determinar el tirante promedio.

$$\bar{y} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2}$$

- Calcular el área de influencia  $A_i$ , de la siguiente forma:

$$A_i = \bar{y}_i * b$$

Donde:

- $A_i$ : área de influencia del tramo  $i$
  - $\bar{y}_i$ : tirante promedio del área de influencia  $i$
  - $b$ : ancho del área de influencia
- Determinar la velocidad media en cada vertical de la siguiente forma:

$$\bar{V}_i = \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2}$$

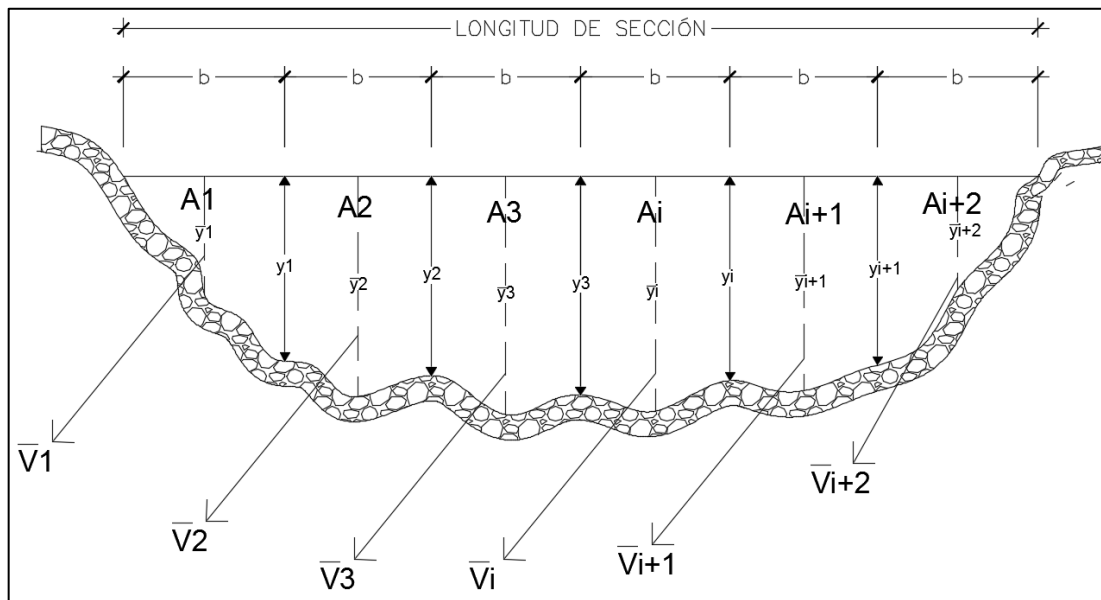
- Determinar los caudales  $Q_i$  de cada área de influencia  $A_i$  de la sección.

$$Q_i = \bar{V}_i * A_i$$

- El caudal total, será entonces la suma de todos los caudales parciales de la sección.

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$$

Figura 5. **División de sección de aforo con molinete**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

### 1.3.3.2. Aforos con flotadores

Es utilizado cuando se quiere realizar un aforo rápido, no se disponga de un molinete, los niveles de agua sean bajos y no permitan medir las velocidades con el molinete, o las condiciones en el río o canal de agua a medir, representen un peligro para las personas o el equipo de medición; entre sus desventajas se encuentra su imprecisión, debido a que la velocidad medida es la superficial.

Este método se basa en que los objetos se mueven a la misma velocidad que el agua en el que están flotando, por lo que es importante que el flotador quede sumergido en gran parte, para que no sea influenciado por la velocidad del viento. Para realizar la medición es conveniente realizar los siguientes procedimientos:

- Seleccionar un tramo recto A, B, y medir la distancia que recorrerá el flotador; es recomendable una distancia entre 10 m y 30 m.
- Calcular la profundidad promedio ( $h_p$ ) de la sección, dividiéndola como mínimo en 3 tramos y midiendo la profundidad de cada uno de ellos para luego obtener el promedio.
- Determinar el área de la sección del río o canal, de la siguiente forma:

$$A = h_p * a$$

Donde:

- A: área de la sección, en expresada en  $m^2$

- Hp: profundidad promedio en m
- a: ancho del río o canal, en m
- Lanzar como mínimo 3 flotadores en el margen derecho, 3 en el centro y 3 en el margen izquierdo, de la sección del río o canal de agua. Los flotadores deben ser lanzados antes de pasar por el punto A, esto para que alcancen una velocidad constante antes de iniciar a tomar el tiempo.
- Con la ayuda de un cronometro tomar el tiempo que tarda cada flotador en realizar el recorrido, iniciar cuando el flotador pase por el punto A, y finalizar cuando pase por el punto B.
- Hallar el tiempo promedio de las mediciones realizadas.
- Calcular la velocidad, mediante la fórmula:

$$V = \frac{d}{t_p}$$

Donde:

- V: velocidad superficial, expresada en metros sobre segundos (m/s).
- d: distancia expresada en metros (m), recorrida por el flotador desde el punto A hasta B.
- tp: tiempo promedio expresado en segundos (s), que recorren flotadores desde el punto A hasta B.



- Hallar la velocidad media en la vertical ( $V_m$ ), la cual es el valor de la velocidad corregida en cada sección. Se calcula de la siguiente manera:

$$V_m = k * V$$

Donde:

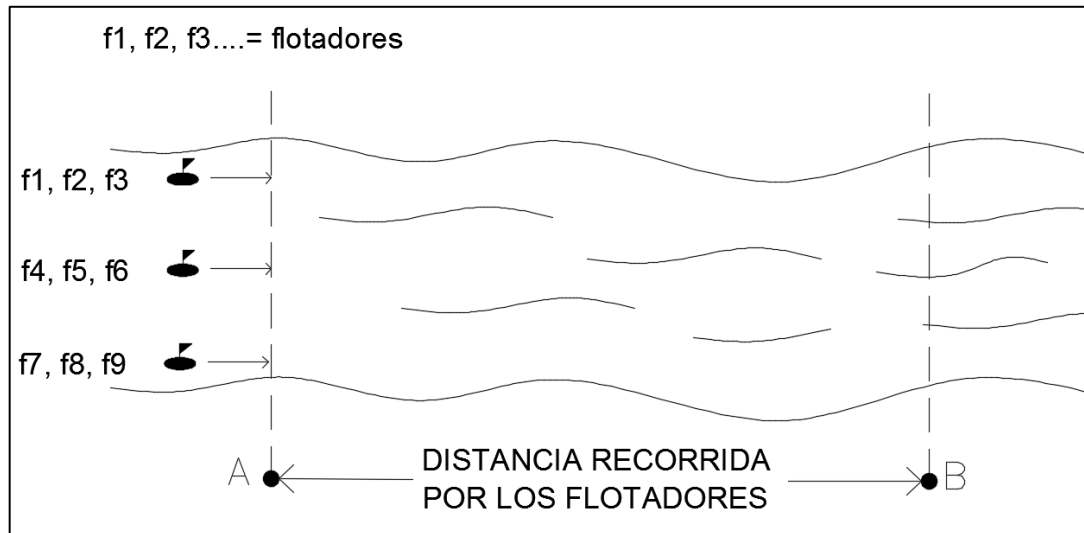
- $V_m$ : velocidad media en la vertical expresada en m/s.
  - $K$ : Coeficiente que existe entre la velocidad media de la sección y la velocidad superficial para los diferentes tipos de cauces; suele variar entre 0,75 y 0,90.
  - $V$ : velocidad superficial expresada en m/s.
- Determinar el caudal, por medio de la siguiente fórmula:

$$Q = A * V_m$$

Donde:

- $Q$ : caudal, en  $m^3/s$
- $A$ : área transversal de la sección del río, en  $m^2$
- $V_m$ : velocidad media del agua, en m/s

Figura 6. Aforo con flotadores



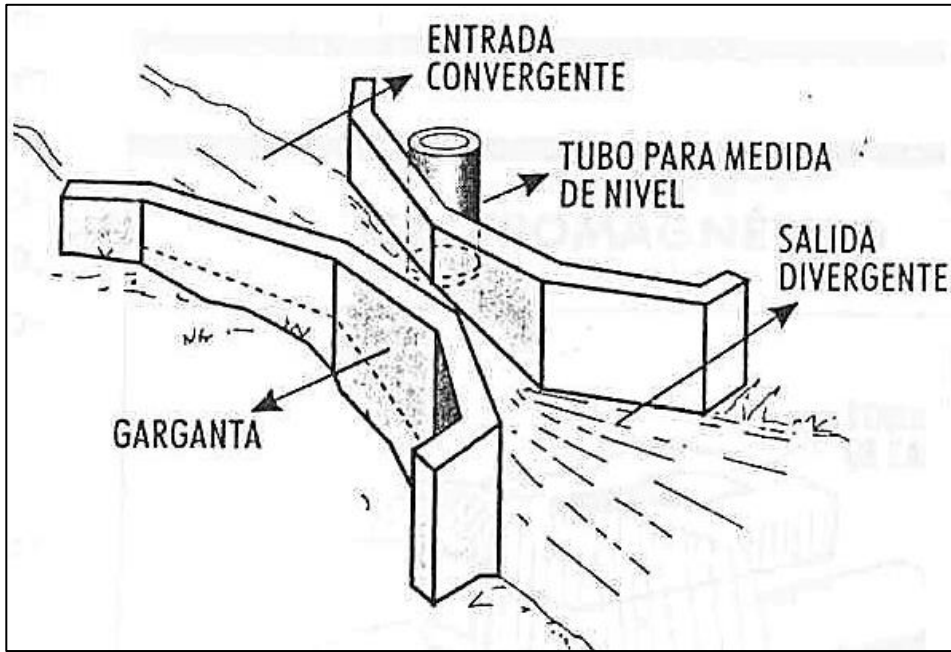
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

#### 1.3.4. Canal Parshall

Es una estructura hidráulica diseñada para medir caudales en canales con flujo en régimen crítico; consta de cuatro partes principales: transición de entrada, sección convergente, garganta y sección divergente. Para conocer el caudal se debe medir el tirante de agua en la sección convergente del canal de Parshall, posteriormente, se ingresa ese valor en una ecuación característica.

Para su fabricación se pueden utilizar varios materiales: madera, láminas de metal, concreto, mampostería, o fibra de vidrio. Un canal Parshall es recomendado para ser utilizado en canales de riego y plantas de tratamiento.

Figura 7. **Canal Parshall**



Fuente: Datateca. *Canal Parshall*. [www.datateca.unad.edu.com](http://www.datateca.unad.edu.com). Consulta: 19 de diciembre de 2016.

## **2. VERTEDEROS**

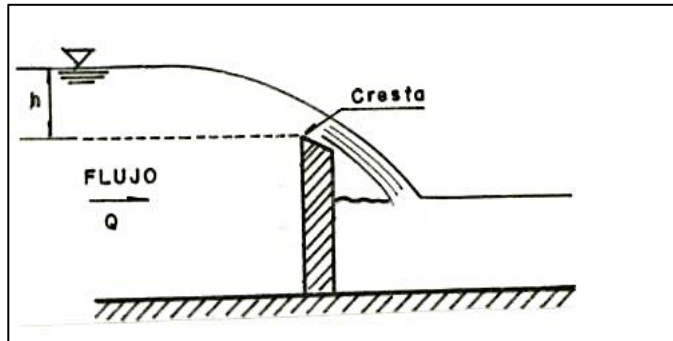
### **2.1. Definición de vertedero**

Un vertedero es una estructura hidráulica en forma de pared, que permite el paso del flujo de agua por medio de una abertura, la cual puede variar de forma y tamaño, dependiendo de la finalidad para el cual se utilice; puede ser utilizado para la medición de caudales, así como para el control del nivel del flujo.

Para conocer el caudal que circula a través del canal únicamente es necesario conocer el tirante de agua para luego introducirlo en la ecuación característica del vertedero, la cual depende de la forma y el tipo de vertedero. Como medidor de caudales, los vertederos ofrecen principalmente las siguientes ventajas:

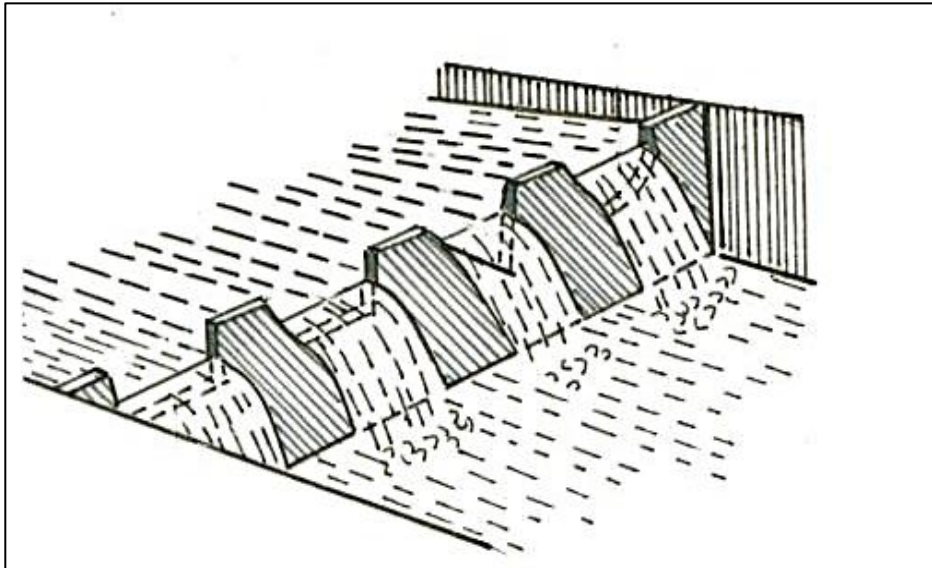
- Precisión en los aforos
- Construcción sencilla y rápida
- Larga duración

Figura 8. **Vertederos usados para medición de caudales**



Fuente: MARBELLO PEREZ, Ramiro. *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. p. 6.

Figura 9. **Vertedero usado para control del nivel del flujo**

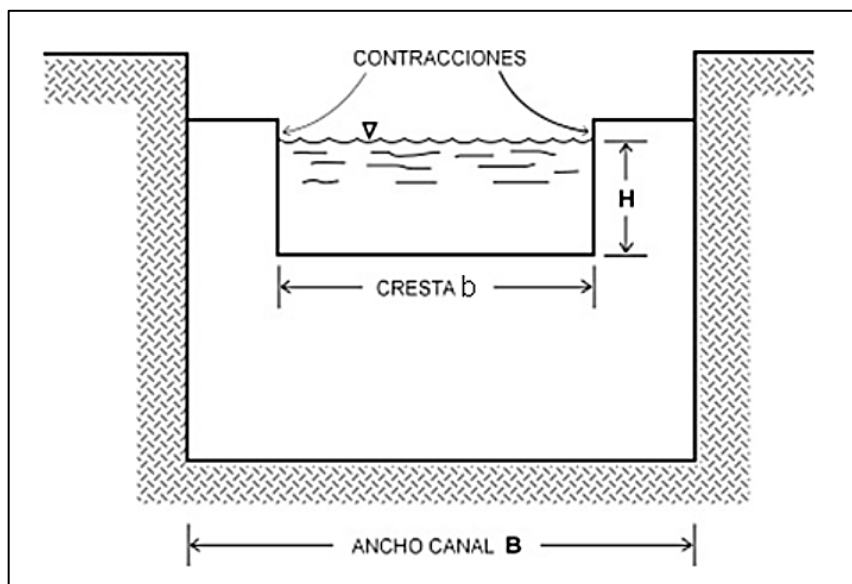


Fuente: MARBELLO PEREZ, Ramiro. *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. p. 6.

### 2.1.1. Terminología

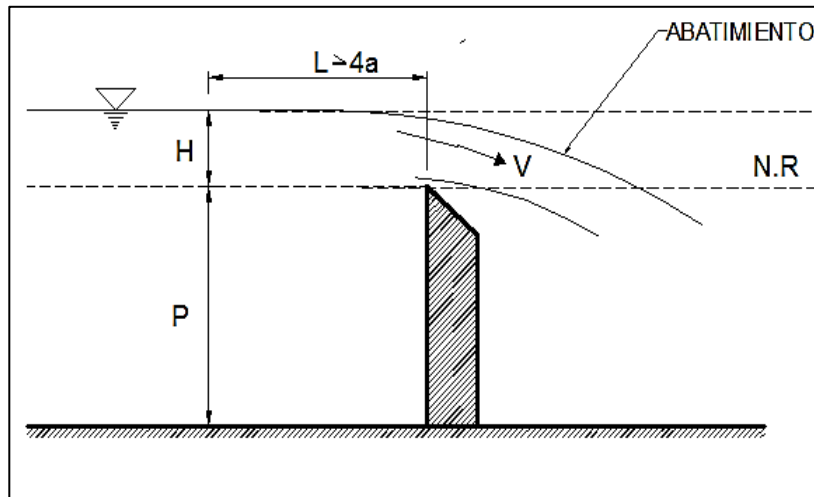
- Cresta (b): es el borde superior del vertedero, también puede llamársele pared o umbral.
- Contracción: está constituido por los bordes o caras verticales del vertedero.
- Carga (H): es la altura que alcanza el nivel de agua, medida a partir de la cresta del vertedero. Debido a la depresión que sufre la lámina vertiente junto al vertedero, la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia igual o superior a 4H.

Figura 10. Vista frontal de un vertedero rectangular y sus partes



Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 7.

Figura 11. **Perfil de un vertedero en funcionamiento**



Fuente: MIRANDA, Julio. *Calibración de vertederos trapezoidales tipo cipolletti de pared delgada de ancho variable.* p. 3.

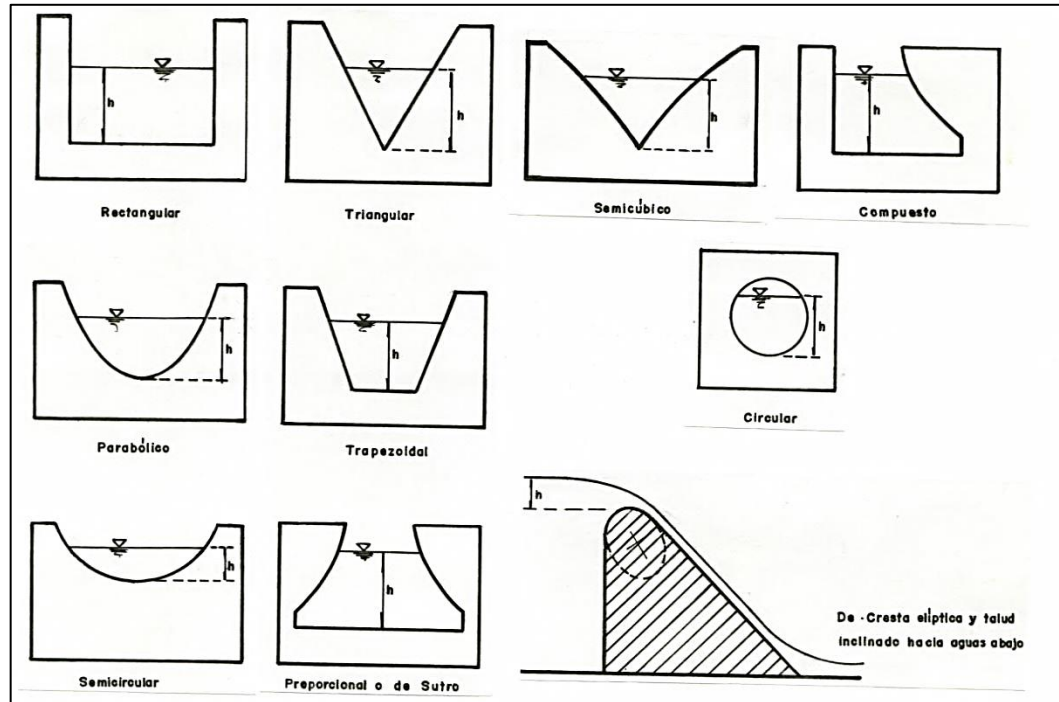
## 2.2. Clasificación de los vertederos

Son varios los factores que pueden tomarse en cuenta para realizar una clasificación de vertederos: la forma, el espesor de la pared y longitud de cresta.

### 2.2.1. Clasificación de los vertederos por su forma geométrica

Pueden ser simples o compuestos; dentro de los vertederos simples están: rectangulares, triangulares, circulares, dentro de los vertederos semicirculares. Los vertederos compuestos están compuestos por secciones combinadas como los de tipo sutro.

Figura 12. **Diferentes formas de vertederos**



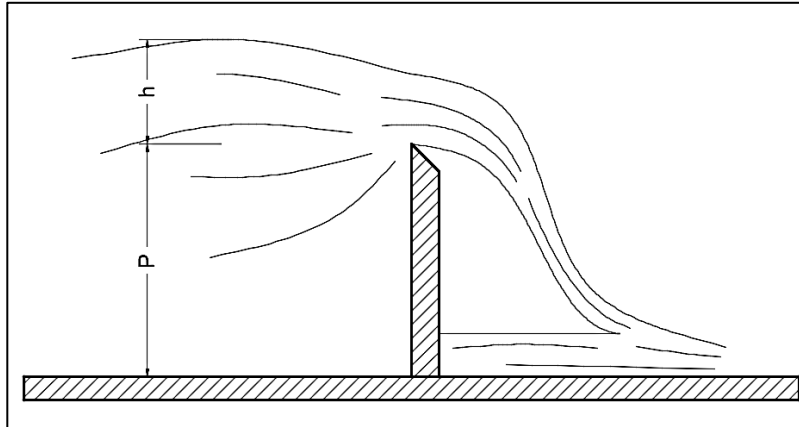
Fuente: MARBELLO PEREZ, Ramiro. *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. p. 11.

### 2.2.2. Clasificación de los vertederos según la altura de la lámina de agua, aguas abajo

De acuerdo con el espesor de la lámina de aguas abajo, se clasifican en: vertederos de descarga libre y vertederos sumergido o ahogados.

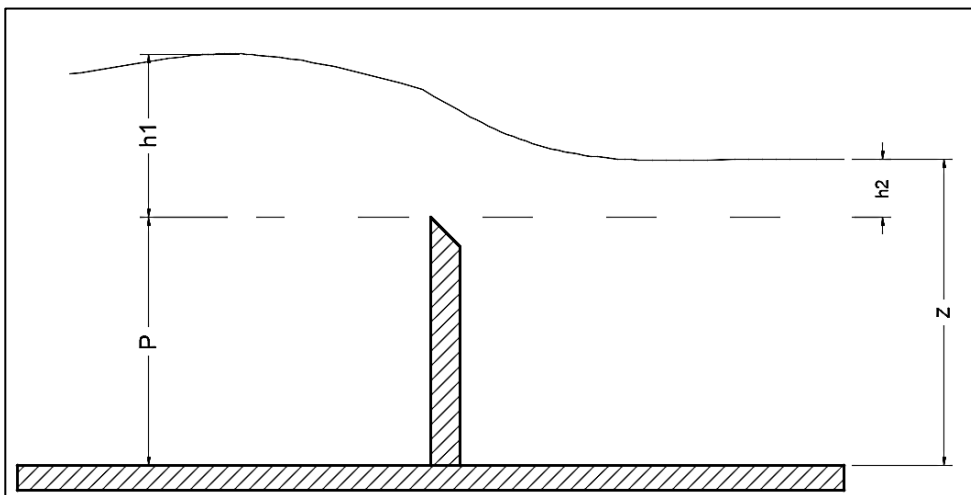


Figura 13. **Vertedero de descarga libre**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 14. **Vertedero sumergido**



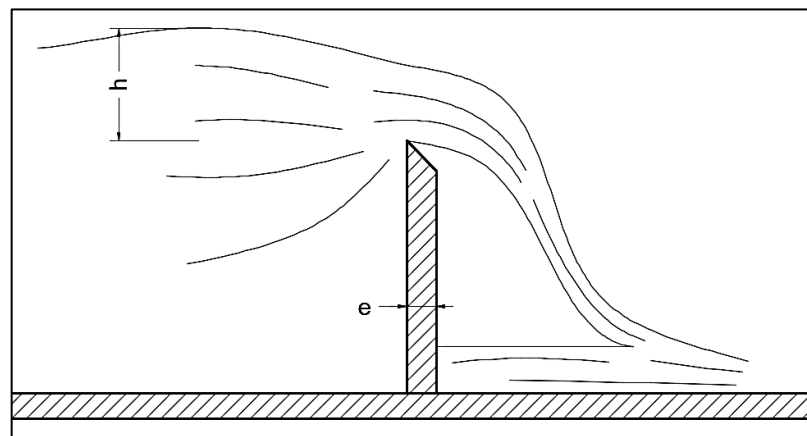
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

### 2.2.3. Clasificación de los vertederos según el espesor de pared

Se dividen en vertederos de pared delgada y vertederos de pared gruesa.

En los vertederos de pared delgada, la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma, pero con arista aguda. Son utilizados para medir caudales con gran precisión.

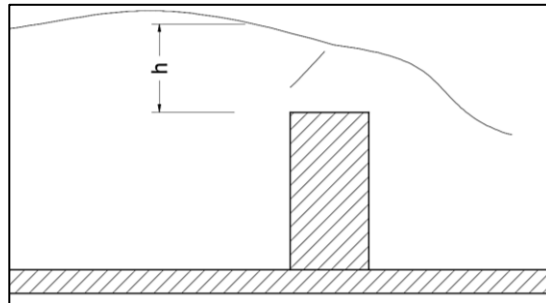
Figura 15. **Vertedero de pared delgada**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Los vertederos de pared gruesa poseen una superficie de contacto entre la lámina líquida vertiente y un relativamente grande, cumpliéndose con  $e > 0,5H$ . Son utilizados generalmente para controlar niveles.

Figura 16. **Vertedero de pared gruesa**



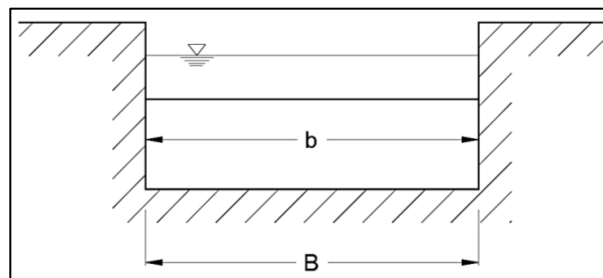
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

#### 2.2.4. **Clasificación de los vertederos según la longitud de la cresta**

Se clasifican en vertederos sin contracciones laterales y vertederos con contracciones laterales.

Los vertederos sin contracciones laterales poseen la longitud de la cresta de igual tamaño que la base del canal sobre el cual han sido colocados, cumpliéndose  $b=B$ .

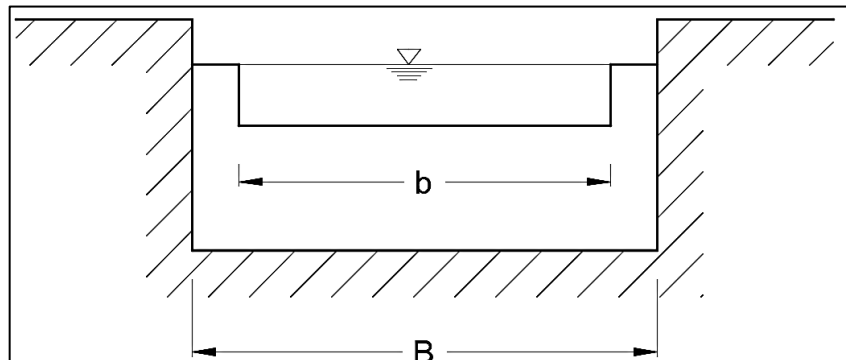
Figura 17. **Vertedero sin contracciones laterales**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Los vertederos con contracciones laterales poseen la longitud de la cresta de menor tamaño que la base del canal sobre el cual han sido colocados, cumpliéndose  $b < B$ .

Figura 18. **Vertedero con contracciones laterales**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

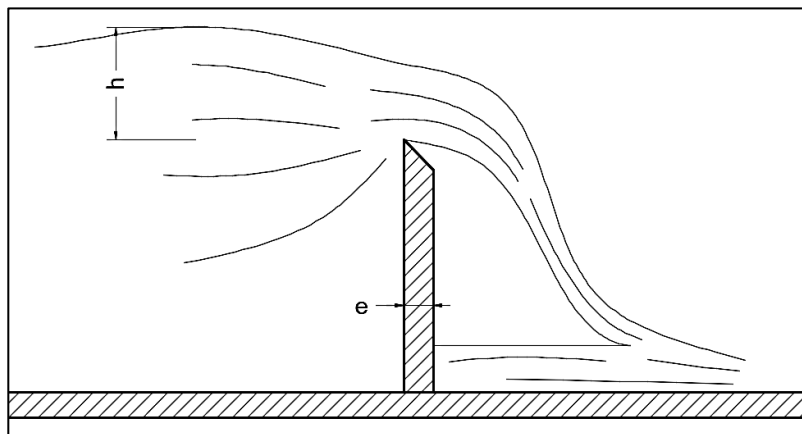
### 2.3. **Vertederos de pared delgada**

Esta clase de vertederos se caracteriza por tener una arista muy fina la cual se logra biselando la hoja del material de fabricación; esto con el fin de evitar que se formen líneas de corriente paralelas a la pared, cuando el flujo de agua pase sobre ella; lo cual originaría una distribución hidrostática de presiones y el modelo hidráulico utilizado ya no sería válido.

Son utilizados para medir caudales con gran precisión, para lograrlo, es necesario que los vertederos de pared delgada estén bien instalados, para lo cual se deben verificar los siguientes aspectos:

- La pared del vertedero debe estar colocada perpendicularmente a la dirección de la corriente.
- Con el fin de calmar cualquier turbulencia que presente el agua antes de llegar al vertedero, deberá instalarse un canal de alimentación o poza de amortiguación aguas arriba.
- Para medir la altura de la carga de agua ( $H$ ), el medidor deberá instalarse a una distancia mayor o igual a  $4H$ , detrás de la pared del vertedero; para que la curva de descenso de la corriente no afecte la medición.

Figura 19. **Perfil vertedero de pared delgada**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

## 2.4. Secciones típicas

Son varias las formas geométricas que pueden adoptarse para el paso del fluido a través de un vertedero; cada una posee sus ventajas y desventajas, las

cuales dependerán del caudal y el tipo de fluido a medir. Dentro de las secciones típicas se encuentran las siguientes.

#### **2.4.1. Vertedero rectangular sin contracciones**

Es aquel vertedero que posee una abertura de forma rectangular, cuyo ancho de cresta es igual al ancho del canal en donde está colocado. Debido a su forma geométrica es de fácil construcción y por ende uno de los más utilizados.

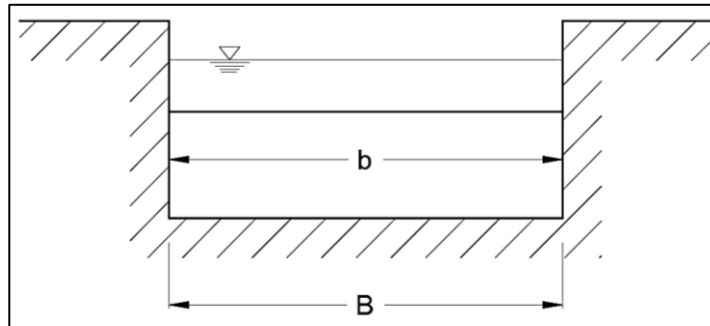
Se recomienda utilizarlo para caudales grandes, para que pueda tenerse una altura de carga (H) que permita una medición confiable. La ecuación para un vertedero rectangular sin contracciones es:

$$Q = 1,84bH^{3/2}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- b: longitud de la cresta de vertedero, en metros
- H: altura observada, en metros

Figura 20. **Vertedero rectangular sin contracciones**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

#### 2.4.2. **Vertedero rectangular con contracciones**

Es aquel vertedero que posee una abertura de forma rectangular, cuyo ancho de cresta es más pequeño que el ancho del canal en donde está colocado. Debido a las contracciones laterales, la lámina vertiente se contrae en sentido horizontal, reduciendo el caudal que puede medirse y aumentando el tirante del fluido; por lo que es recomendable para medir caudales medios.

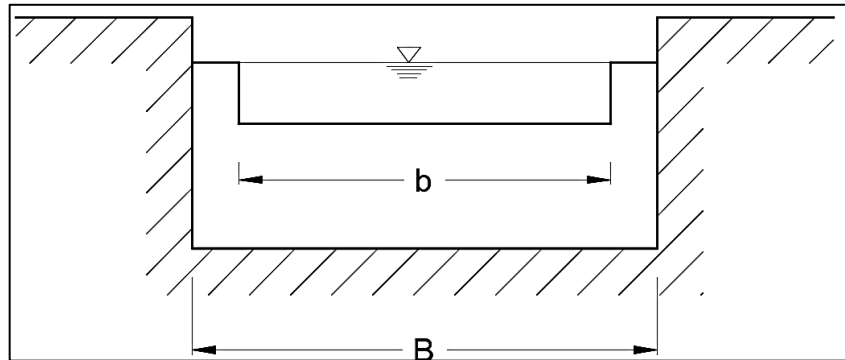
La ecuación para un vertedero rectangular con contracciones es:

$$Q = 1,84(b - 0,1NH)H^{3/2}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- N: número de contracciones del vertedero
- b: longitud de la cresta de vertedero, en metros
- H: altura observada, en metros

Figura 21. **Vertedero rectangular con contracciones**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

### 2.4.3. **Vertedero triangular**

Es aquel vertedero que posee una abertura en forma triangular con forma invertida; esto con el fin de elevar la carga (H) del fluido y lograr una mayor precisión en la medida del caudal. Generalmente solo son empleados los vertederos que tienen forma de triángulos isósceles, con 90° en la parte inferior.

Se recomienda usarlos para medir caudales pequeños con gran precisión. La ecuación para un vertedero triangular es:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(H^{\frac{5}{2}}\right)$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- C<sub>d</sub>: Coeficiente de descarga (experimentalmente determinado)
- H: altura observada, en metros



Para un vertedero con forma triangular isósceles, se tienen las siguientes condiciones:

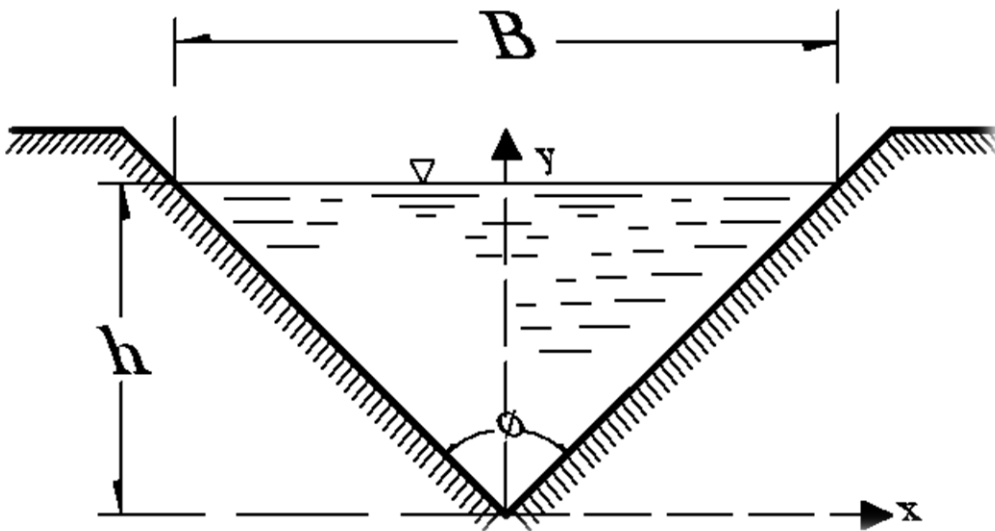
$$\theta = 90^\circ, \tan(\theta/2) = 1, \text{ para } 0,05\text{m} \leq H \leq 0,20\text{m}, \text{ y } C_d = 0,593$$

Quedando la expresión de la siguiente forma:

$$Q = \frac{8}{15} (0,593) \sqrt{2(9,81)} * \tan(45^\circ) \left(H^{\frac{5}{2}}\right)$$

$$Q = 1,40 \left(H^{\frac{5}{2}}\right)$$

Figura 22. **Vertedero triangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

#### 2.4.4. Vertedero trapezoidal tipo Cipolletti

Es aquel vertedero que posee un corte trapezoidal con la base menor en la parte inferior, puede considerarse que está formado por un vertedero rectangular al centro y uno triangular formado por los triángulos de los extremos; por lo que para calcular su caudal puede utilizarse la suma de los caudales individuales de estos vertederos; aunque su precisión no es confiable.

$$Q = 1,84bH^{3/2} + \frac{8}{15}\sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(H^{\frac{5}{2}}\right)$$

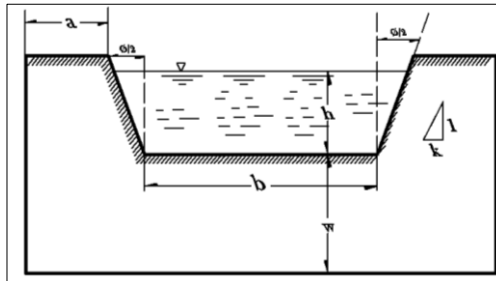
Fue diseñado por el ingeniero Cesare Cipolletti, con la característica que la pendiente de inclinación de los lados es de cuatro unidades verticales por cada unidad horizontal (1H:4V); esto con la finalidad de que las ampliaciones laterales compensen el gasto disminuido por las contracciones laterales del vertedero rectangular. La ecuación para un vertedero trapezoidal tipo Cipolletti es:

$$Q = 1,86bH^{3/2}$$

Donde:

- b: longitud de la cresta del vertedero, en metros
- H: altura de la carga observada, en metros

Figura 23. **Vertedero trapezoidal tipo Cipolletti**



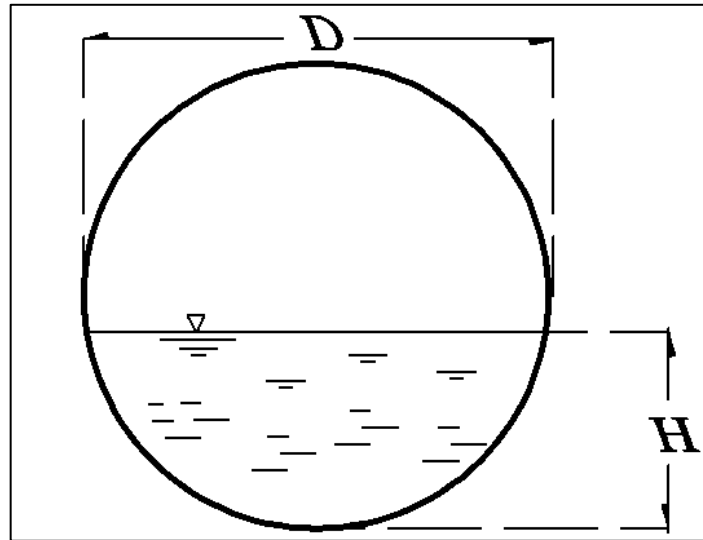
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

## 2.5. **Vertederos circulares**

Un vertedero circular es aquel que posee un corte de forma circular para permitir el paso de la corriente, a pesar de su facilidad de construcción y de no requerir nivelación de cresta; es un vertedero poco usado del cual se tienen pocos registros, relegándose la mayor parte del tiempo para la medición experimental de caudales pequeños en laboratorios.

Para obtener la ecuación teórica que determine el caudal a través de este tipo de vertederos se requiere de un análisis bastante complejo desde el punto de vista matemático como se verá más adelante, pues, en su análisis conduce a dos integrales elípticas y funciones de relación  $h/D$  para determinar el coeficiente de gasto.

Figura 24. **Vertedero circular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

## 2.6. **Instalación de vertederos**

Para realizar una medición confiable y precisa con vertederos es necesario instalarlos correctamente, para lo cual se deben considerar las siguientes recomendaciones.

- La pared del vertedero ha de ser perpendicular a la dirección de la corriente.
- La cresta del vertedero debe quedar perfectamente horizontal, de forma que la lámina de agua tenga el mismo espesor en toda su anchura y toque a la cresta en una sola línea de puntos.
- El borde aguas arriba debe ser afilado para que el agua que cae lo toque en un solo punto.

- La cresta debe estar a una altura tal que el agua caiga libremente dejando un espacio de aire por debajo de la lámina de agua rebosante, entre esta y la pared. Si el agua más abajo del vertedero sube de nivel hasta superar la altura de la cresta, la caída libre del agua es imposible y entonces se dice que el vertedero está sumergido. A menos que se hagan complicadas correcciones, los aforos con vertederos sumergidos no son dignos de confianza.
- El limnómetro debe ser colocado en la cara de aguas arriba de la estructura del vertedero, a suficiente distancia hacia un lado para que se encuentre en aguas tranquilas, con tal de que no le afecte la curvatura de la superficie del agua antes de alcanzar la cresta. El cero del limnómetro debe enrasarse con la cresta del vertedero; para ello puede emplearse un nivel de carpintero o un nivel de topografía.

## **2.7. Dimensión de vertederos**

Para ser empleados como instrumentos de medición, los vertederos deben cumplir con ciertos parámetros, que permitan resultados confiables.

Las dimensiones de los vertederos que deben cumplirse con las siguientes:

- La altura de la cresta (P) del vertedero sobre el fondo del canal de ingreso debe ser por lo menos el doble de la carga del vertedero, o bien como mínimo  $P > 30$  cm.
- La distancia de los lados de la sección de control de ingreso debe ser por lo menos el doble de la carga del vertedero como un mínimo de 30 cm.

- La carga del vertedero río arriba sobre la cresta no debe ser menos que 6 cm ni mayor de 60 cm.
- Revisar el nivel de ahogamiento: Si  $Y_2 < 0,9P$ , puede continuar.
- Revisar el ancho del vertedero, para ello debe estar comprendido entre  $15 \text{ cm} < b < 200 \text{ cm}$ , si es así entonces se puede continuar. En caso contrario, es necesario hacer modificaciones a la estructura hasta que se cumpla este requerimiento.

## **2.8. Características y principios de funcionamiento en vertederos circulares**

A continuación, se describen las características y principios de funcionamiento en vertederos circulares.

### **2.8.1. Ventajas de los vertederos circulares**

Un vertedero circular posee las siguientes ventajas:

- Simplicidad y sencillez de construcción.
- Alta precisión.
- No requieren nivelación en su cresta ni de bisectriz vertical.
- No requiere de gran equipo para ser instalado, y por ende es económico en su instalación.
- Larga duración.
- Ventilación asegurada.
- Recomendado para aforar caudales pequeños.

### **2.8.2. Desventajas de los vertederos circulares**

Un vertedero circular posee las siguientes desventajas:

- Acumulación de grava arena y limos, aguas arriba del vertedero, lo que resta exactitud en las mediciones.
- Posibilidad de obstrucción de parte de objetos flotantes de gran tamaño.

### **2.8.3. Principios de funcionamiento de los vertederos circulares**

Un vertedero circular tiene los siguientes principios de funcionamiento:

- Intercepta la corriente, para causar una elevación del nivel de agua
- El flujo a través del vertedero tiene su motor en la fuerza de gravedad

## **2.9. Fórmula teórica para calcular caudales en vertederos circulares**

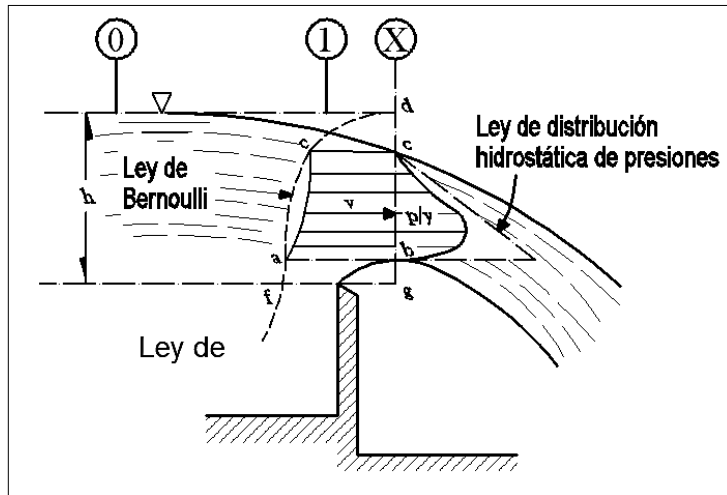
A continuación, se presentan las dos ecuaciones teóricas conocidas para calcular caudales en vertederos circulares.

### **2.9.1. Ecuación de Staus – Von Sanden**

Fue deducida por primera vez por A. Staus y K. Von Sanden, en 1926.

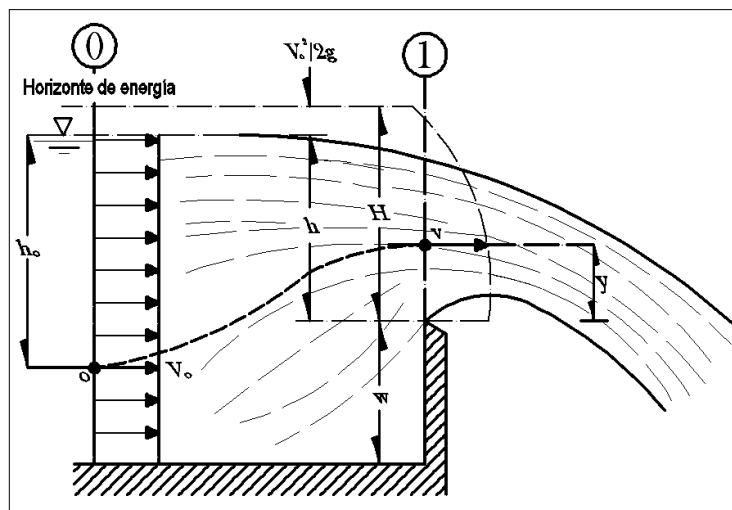
Para la deducción de esta ecuación se consideraron condiciones ideales, suponiendo que todos los puntos sobre la cresta del vertedero, tienen velocidades con dirección horizontal y distribución parabólica; también, se omite la pérdida de energía, la cual es considerada agregando un coeficiente de descarga.

Figura 25. **Aspecto real del flujo en un vertedero**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 26. **Aspecto idealizado del flujo en un vertedero**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.



A continuación, se presenta la deducción de la ecuación Staus – Von Sanden:

Tomando como base la figura 26, se analizan los puntos 0 y 1, en la superficie libre del fluido, en una sección suficientemente lejos aguas arriba del vertedero, y justo encima de la cresta, respectivamente.

Aplicando la ecuación de Bernoulli para una línea de corriente entre los puntos 0 y 1, se tiene:

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = (h_0 - h + y) + \frac{V^2}{2g}$$

O bien:

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g} = y + \frac{V^2}{2g}$$

Si la velocidad en el punto 0 es despreciable, entonces:

$$\frac{V_0^2}{2g} = 0$$

Por lo tanto, la velocidad en cualquier punto de la sección 1 vale:

$$v = \sqrt{2g(h - y)}$$

El gasto a través del área elemental en el vertedero circular es entonces:

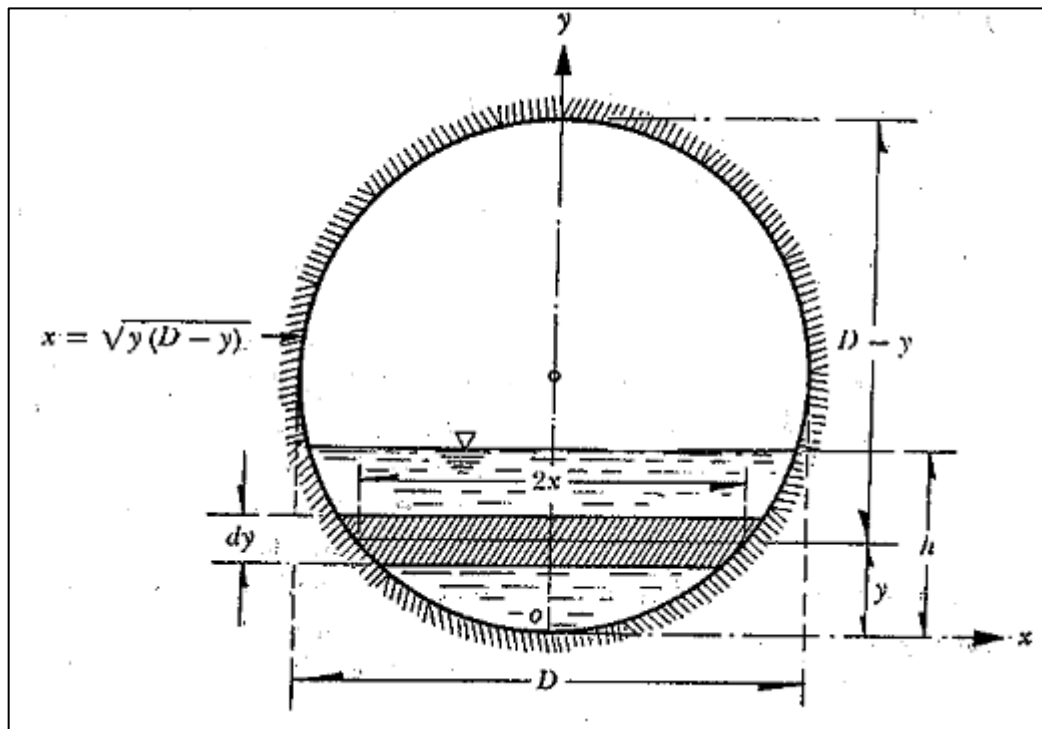
$$dQ = 2\sqrt{2g} C_d x \sqrt{2g(h - y)} dy$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga, el cual considera el efecto de contracción de la lámina vertiente y la pérdida de energía.

El gasto total viene dado por la siguiente expresión:

$$Q = 2C_d\sqrt{2g} \int_0^h x\sqrt{h-y} dy$$

Figura 27. **Análisis de flujo en un vertedero circular**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 255.

De la ecuación de la circunferencia, se tiene que:

$$x = \sqrt{y(D - y)}$$

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación de gasto total, se tiene:

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{y(D - y)(h - y)} dy$$

Multiplicando y dividiendo por  $D^{5/2} = \sqrt{D^5}$ , resulta:

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} \int_0^h \left( \frac{\sqrt{y(D - y)(h - y)}}{D^{5/2}} D^{5/2} \right) dy$$

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} \int_0^h \left( \frac{\sqrt{y(D - y)(h - y)}}{D^{5/2}} D^{5/2} \right) dy$$

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} \int_0^h \left( \sqrt{\frac{y(D - y)(h - y)}{D^5}} \right) dy$$

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} D^{5/2} \int_0^h \left( \sqrt{\frac{y}{D} \left( \frac{D - y}{D} \right) \left( \frac{h - y}{D} \right) \left( \frac{1}{D^2} \right)} \right) dy$$

$$Q = 2C_d \sqrt{2g} D^{5/2} \int_0^h \left( \sqrt{\frac{y}{D} \left( \frac{D - y}{D} \right) \left( \frac{h - y}{D} \right)} \right) d \left( \frac{y}{D} \right)$$

$$Q = 2C_d\sqrt{2g} D^{5/2} \int_0^h \left( \sqrt{\frac{y}{D} \left(1 - \frac{y}{D}\right) \left(\frac{h}{D} - \frac{y}{D}\right)} \right) d\left(\frac{y}{D}\right)$$

Para resolver la integral, se realizan las siguientes transformaciones:  $k^2 = h/D$  (menor que 1) y  $z = y/D$ , la ecuación anterior se transforma en:

$$Q = 2C_d\sqrt{2g} D^{5/2} \int_0^{k^2} \left( \sqrt{z(1-z)(k^2-z)} \right) dz$$

Si  $y = 0$ ,  $z = 0$ ; y si  $y = h$ ,  $z = (h/D)k^2$

La resolución de la integral de la ecuación anterior, genera las integrales elípticas complejas, E y F, quedando transformada en:

$$Q = \frac{4}{15} \sqrt{2g} C_d D^{5/2} [2(1 - k^2 + k^4)E - (2 - 3k^2 + k^4)F]$$

Realizando la siguiente sustitución:

$$W = 2(1 - k^2 + k^4)E - (2 - 3k^2 + k^4)F$$

Se tiene:

$$Q = \frac{4}{15} \sqrt{2g} C_d W D^{5/2}$$

Y llamando:

$$\phi = \frac{4}{15} \sqrt{2g} W$$

Obteniendo finalmente, la ecuación de Staus – Von Sanden:

$$Q = C_d \phi D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- C<sub>d</sub>: coeficiente de descarga, adimensional
- $\phi$ : función de h/D en m<sup>1/2</sup>/s
- D: diámetro del vertedero en m

Para calcular  $\phi$  en m<sup>1/2</sup>/s, Ramponi propone la siguiente ecuación aproximada:

$$\phi = 3,203 \left(\frac{H}{D}\right)^{1,975} - 0,842 \left(\frac{H}{D}\right)^{3,78}$$

El coeficiente de descarga, C<sub>d</sub>, puede ser calculado utilizando la ecuación propuesta por Stauss y Jorissen; la cual es válida para 0,20 ≤ D ≤ 0,30 m y para 0,075 < h/D < 1,0; también, debe existir una distancia mínima de tres veces el diámetro entre los bordes del vertedero y las fronteras del canal de acceso.

$$C_d = 0,555 + \frac{D}{110H} + 0,041 \frac{H}{D}$$

Si el vertedero no cumple con la exigencia de la distancia mínima entre sus bordes y las fronteras del canal de acceso, Ramponi propone la siguiente ecuación, válida para vertederos con D < 1,0 m.

$$C_d = \left(0,35 + \frac{0,002}{H/D}\right) \left(1 + \left(\frac{A}{A_0}\right)^2\right)$$

Donde:

- Cd: coeficiente de descarga
- H: carga de agua, en m
- D: diámetro del vertedero, en m
- A: área mojada del vertedero entre la cresta y la carga h correspondiente
- A<sub>0</sub>: área mojada del canal de acceso

Tabla I. Valores de  $\phi$  para vertederos circulares de pared delgada

h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)	h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)	h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)
0,01	0,00047	0,25	0,2030	0,49	0,7223
0,02	0,00154	0,26	0,2190	0,50	0,7506
0,03	0,00319	0,27	0,2355	0,51	0,7782
0,04	0,00543	0,28	0,2527	0,52	0,8062
0,05	0,00893	0,29	0,2704	0,53	0,8344
0,06	0,0120	0,30	0,2886	0,54	0,8630
0,07	0,0164	0,31	0,3072	0,55	0,8920
0,08	0,0215	0,32	0,3264	0,56	0,9212
0,09	0,0273	0,33	0,3460	0,57	0,9509
0,10	0,0338	0,34	0,3660	0,58	0,9809
0,11	0,0409	0,35	0,3866	0,59	1,011
0,12	0,0487	0,36	0,4076	0,60	1,0416
0,13	0,0571	0,37	0,4291	0,61	1,0724
0,14	0,0661	0,38	0,4511	0,62	1,1035
0,15	0,0758	0,39	0,4735	0,63	1,1349
0,16	0,0860	0,40	0,4965	0,64	1,1666
0,17	0,0967	0,41	0,5199	0,65	1,1986
0,18	0,1080	0,42	0,5437	0,66	1,2308
0,19	0,1198	0,43	0,5681	0,67	1,2632
0,20	0,1322	0,44	0,5929	0,68	1,2957
0,21	0,1452	0,45	0,6182	0,69	1,3284
0,22	0,1588	0,46	0,6439	0,70	1,3612
0,23	0,1729	0,47	0,6700	0,71	1,1804
0,24	0,1877	0,48	0,6965	0,72	1,2085

Continuación de la tabla I.

h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)	h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)	h/D (adim.)	$\phi$ (m <sup>1/2</sup> /2)
0,73	1,2368	0,82	1,7671	0,91	2,0743
0,74	1,2653	0,83	1,8013	0,92	2,1077
0,75	1,2939	0,84	1,8356	0,93	2,1409
0,76	1,5623	0,85	1,8699	0,94	2,1738
0,77	1,5963	0,86	1,9041	0,95	2,2063
0,78	1,6303	0,87	1,9384	0,96	2,2384
0,79	1,6644	0,88	1,9725	0,97	2,2702
0,80	1,6986	0,89	2,0066	0,98	2,3015
0,81	1,7328	0,90	2,0407	0,99	2,3322

Fuente: elaboración propia.

### 2.9.2. Ecuación de patronamiento propuesta por Azevedo y Acosta

Propuesta por José de Azevedo y Guillermo Acosta en el *Manual de hidráulica*; la ecuación del tipo potencial relaciona la carga hidráulica h y el diámetro del vertedero.

$$Q = 1,518D^{0,693}H^{1,807}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- H: carga de agua, en m
- D: diámetro del vertedero, en m

### 2.10. Fórmula experimental para calcular caudales en vertederos circulares

A continuación, se describe la fórmula experimental para calcular caudales en vertederos circulares.

### 2.10.1. Ecuación potencial

El caudal que pasa a través de un vertedero circular está directamente relacionado con la carga de agua  $h$ , y el diámetro del vertedero; por lo cual puede relacionarse con un modelo potencial, quedando su forma general de la siguiente forma:

$$Q = KH^n$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- H: carga de agua, en m
- K: coeficiente de descarga, que agrupa varias constantes
- n: exponente de la carga, el cual depende de la forma geométrica

Los coeficientes K y n, se determinan experimentalmente por medio de ensayos de laboratorio, proceso llamado calibración; para lo cual se hacen pasar varios caudales conocidos a través del vertedero, midiendo con la ayuda de un limnómetro la carga de agua  $h$  que producen. Posteriormente, se procesan los datos matemáticamente principiando por transformar la ecuación general de forma potencial a una forma lineal aplicando la función logaritmo a ambos miembros, así:

$$\text{Log}(Q) = \text{Log}(KH^n)$$

Aplicando leyes de logaritmo:

$$\text{Log}(Q) = \text{Log}(K) + \text{Log}(H^n)$$



$$\text{Log}(Q) = \text{Log}(K) + n\text{Log}(H)$$

Finalmente, la expresión anterior toma la forma de una ecuación lineal:

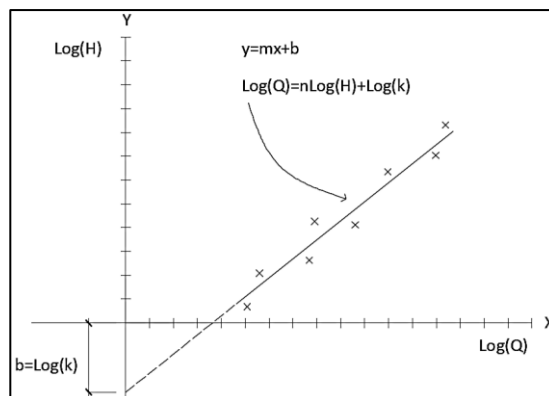
$$y = mx + b$$

Donde:

- y:  $\text{Log}(Q)$
- m: n, representa la pendiente de la recta
- x:  $\text{Log}(H)$
- b:  $\text{Log}(k)$ , representa el intercepto de la recta con el eje y

Si se grafican los pares ordenados obtenidos durante los ensayos de laboratorio ( $\text{log}(H)$ ,  $\text{log}(Q)$ ), se obtiene un conjunto de puntos, al cual se le puede ajustar una recta, por medio de un método de regresión lineal como el de mínimos cuadrados o haciendo uso de un programa informático especializado.

Figura 28. **Regresión lineal a un conjunto de puntos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Una vez obtenida la ecuación de la recta se obtiene directamente el valor de la constante  $n$ , la cual representa la pendiente; el valor de la constante  $k$  se determina indirectamente aplicando antilogaritmo al valor del intercepto de la recta con el eje  $y$ .

- $n = m$
- $k = \text{Log}^{-1}(b)$

Al sustituir los valores de las constantes en la ecuación general, pasa a ser llamada ecuación específica, válida únicamente para el vertedero calibrado.



### **3. ENSAYOS DE VERTEDEROS CIRCULARES**

#### **3.1. Especificaciones técnicas de instalación de vertederos**

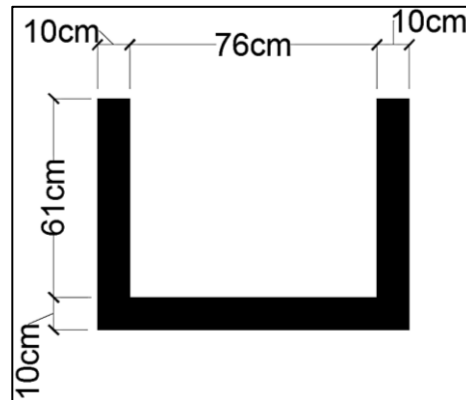
Para la realización de los ensayos, se instalaron los vertederos a calibrar en un canal ancho que se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, en donde el flujo es suministrado por un sistema de bombeo.

**Figura 29. Canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Dimensiones del canal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

En la instalación de los vertederos se tomaron las siguientes especificaciones técnicas para asegurar su confiabilidad y correcto funcionamiento:

- Se colocó la pared del vertedero perpendicular a la dirección de la corriente (ver figura 33).
- Debido a su forma circular, no requirió nivelación en su cresta, que es la ventaja principal de este tipo de vertederos.
- El borde circular del vertedero quedó afilado para que el agua que cae lo toque en un solo punto, y de esta forma asegurar la zona aireada bajo la zona vertiente (ver figura 32).
- La cresta del vertedero quedó a una altura tal que el agua caiga libremente, que evita de esta manera que el vertedero quede sumergido (ver figura 34).

- Se verificó que el limnómetro estuviera colocado aguas arriba del vertedero, donde la corriente sea tranquila y la curvatura de la superficie del agua antes de alcanzar la cresta no afecte las mediciones; este se encontraba instalado dentro de un pozo tranquilizador el cual elimina las alteraciones del nivel de agua causado por ondas que puedan producirse en el canal, mejorando la precisión de las lecturas (ver figura 29).
- Se impermeabilizó el contorno del canal en contacto con el vertedero, utilizando silicón para evitar filtraciones que alteren los resultados (ver figura 33).

Figura 31. **Instalación de vertedero**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Vertedero instalado con la pared perpendicular a la corriente y bordes impermeabilizados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Zona aireada bajo la lámina vertiente**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Diseño y elaboración de vertederos circulares

Se diseñaron y construyeron seis vertederos de pared delgada con diámetros de cuarenta y cuatro, cuarenta, treinta y cinco, treinta, veinticinco, y veinte centímetros; para la fabricación se utilizó lámina metálica con un grosor de 1/8 de pulgada, revestidos de pintura anticorrosiva con la finalidad de garantizar su duración. Para darle estabilidad a la estructura se realizó un marco con perfil angular 1"x1"x1/8 anclado con pernos a las paredes del canal, al cual se sujetaron los vertederos (ver figura 36).

Las dimensiones fueron estimadas en base al ancho del canal a utilizar y el volumen de agua que circulará a través de él.

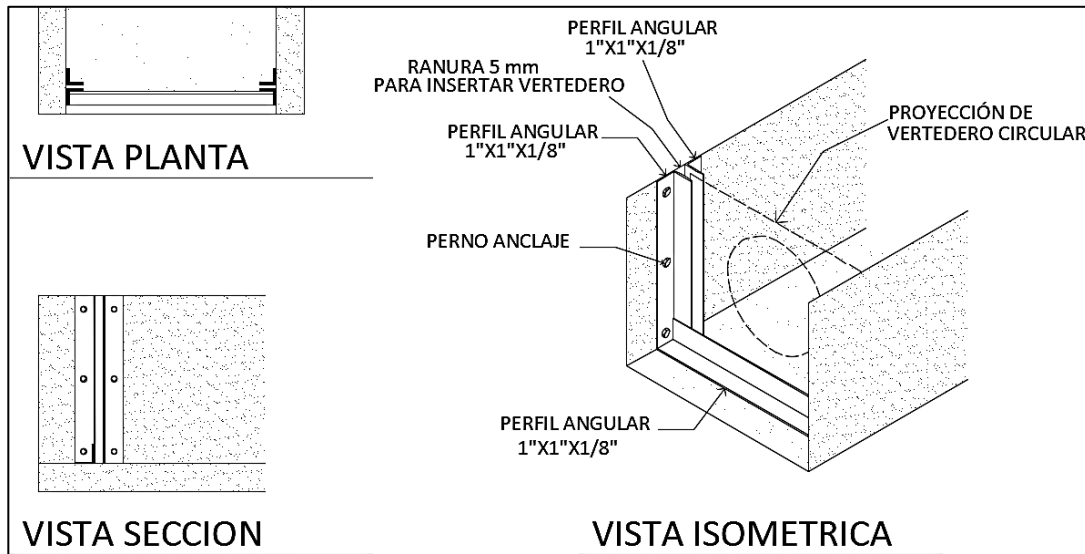
Figura 34. **Proceso de trazado y corte de vertedero circular**



Fuente: elaboración propia.

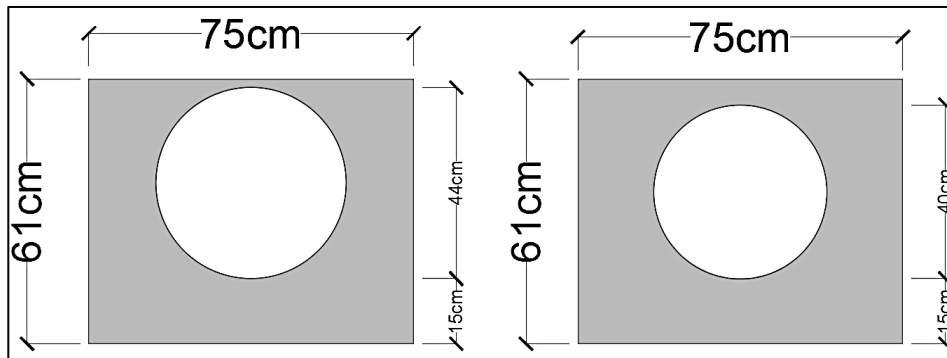


Figura 35. **Detalle de instalación de vertedero circular**



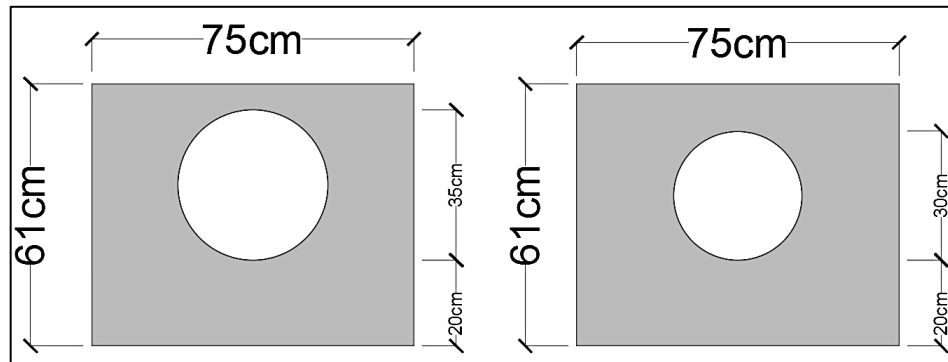
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 36. **Dimensiones de vertederos de diámetro 44 cm y 40 cm**



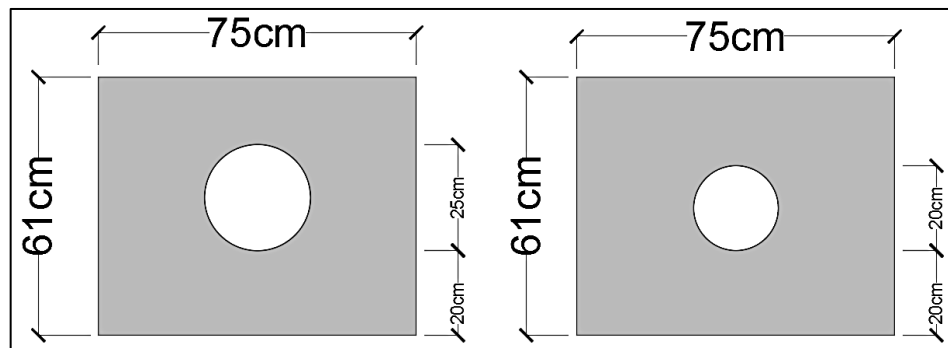
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 37. **Dimensiones de vertederos de diámetro 35 cm y 30 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 38. **Dimensiones de vertederos de diámetro 25 cm y 20 cm**



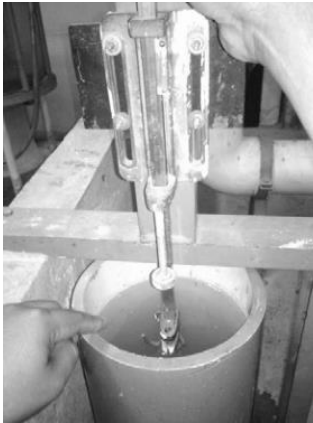
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

### 3.3. **Calibración de los vertederos circulares de distinto diámetro**

Para calibrar los distintos vertederos, se realizaron ensayos en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, en donde se instalaron los vertederos como se indicó anteriormente. El canal cuenta con un pozo tranquilizador con limnómetro para realizar las lecturas con mayor precisión;

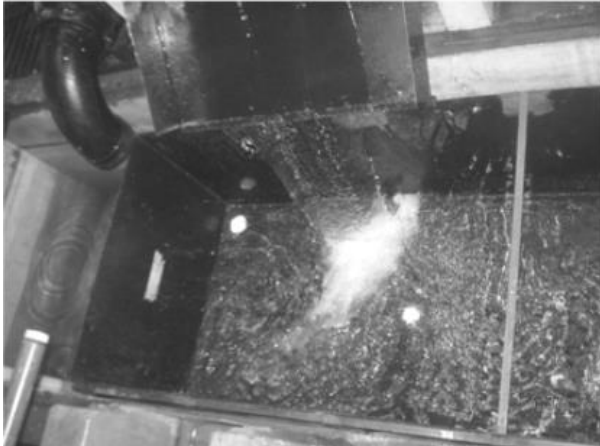
también, se utilizó un depósito calibrado y cronometro para poder realizar el aforo volumétrico.

Figura 39. **Pozo tranquilizador con limnómetro**



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Depósito calibrado**



Fuente: elaboración propia.

### **3.3.1. Ensayo para vertederos circulares de pared delgada**

El procedimiento para realizar los ensayos es el siguiente:

- Fijar el vertedero circular al canal, como se detalló anteriormente comprobando que no existieran filtraciones en sus bordes
- Encender el equipo de bombeo para suministrar agua al canal, hasta alcanzar al nivel de cresta, a esta altura se le denomina  $H_0$ , la cual servirá como referencia para empezar a tomar las lecturas; las cuales serán válidas únicamente si presentan la zona aireada bajo la lámina vertiente.
- Realizar la toma de lecturas de carga  $H$ , haciendo variar el caudal que circula en el canal para obtener diferentes alturas. En cada lectura se efectúan tres aforos volumétricos, midiendo el volumen del depósito calibrado y tomando lectura del tiempo de llenado con el cronómetro.

Figura 41. **Realización de ensayos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Medición del volumen en el depósito calibrado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Sistema de bombeo**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. **Calibración de vertedero circular de diámetro 44 cm**

El ensayo, para este vertedero, sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1., por medio del cual se obtuvieron los datos de caudal real; para posteriormente obtener la ecuación de calibración y experimental.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla II. **Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 44 cm**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
2,5	232,53	169,7512	220,67	165,289	227,58	168,636
5	71,38	193,1798	70,27	189,833	73,06	198,758
7,5	35,88	221,0711	35,20	214,377	36,10	218,840
10	22,32	237,8058	22,62	243,384	23,30	247,847
12,5	18,57	276,8536	18,18	270,160	18,58	276,854
15	13,68	285,7788	13,66	284,663	14,18	295,820
17,5	12,73	340,4456	12,33	329,289	12,23	325,942
20	13,47	447,5480	13,77	457,589	13,4	445,317

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos se procede a calcular los tres caudales por el método volumétrico.

$$Q_{observado} = V/t$$

Donde:

- Q: caudal observado en l/s
- V: volumen en litros
- t: tiempo en segundos

Tabla III. **Caudales observados con vertedero circular de diámetro 44 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2,5	1,10	1,14	1,01	1,08
5	3,96	3,95	3,93	3,95
7,5	8,18	8,34	8,34	8,29
10	14,17	14,20	14,16	14,18
12,5	21,97	21,60	21,39	21,66
15	30,44	30,57	30,61	30,54
17,5	42,65	42,51	42,54	42,56
20	49,93	49,93	49,96	49,94

Fuente: elaboración propia.

Como se explicó en el inciso 2.10.1, la ecuación modelo para este tipo de vertedero es del tipo potencial:

$$Q = KH^n$$

El procedimiento a seguir para la obtención de resultados como se indica en el inciso 2.10.1. es:

- Aplicar logaritmos a los caudales reales y a las alturas H:

Tabla IV. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 44 cm**

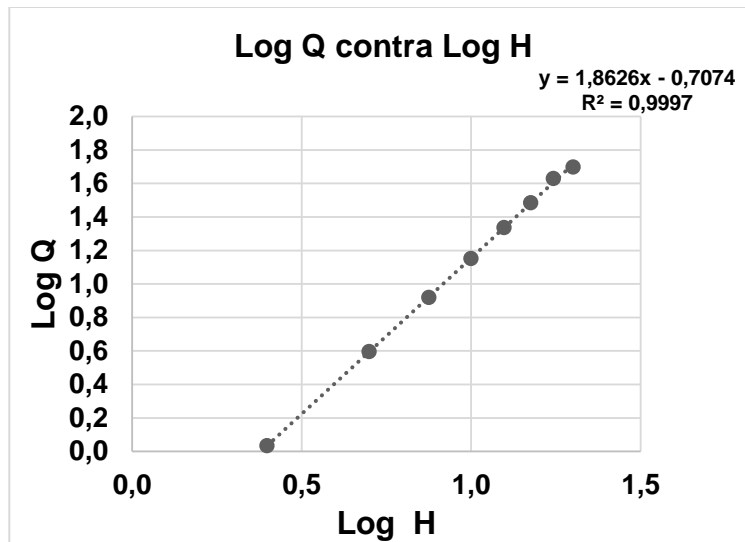
<b>H (cm)</b>	<b>Qr (l/s)</b>	<b>Log H</b>	<b>Log Q</b>
2,5	1,082	0,3979	0,0341
5	3,947	0,6990	0,5962
7,5	8,285	0,8751	0,9183
10	14,177	1,0000	1,1516
12,5	21,655	1,0969	1,3356
15	30,541	1,1761	1,4849
17,5	42,563	1,2430	1,6290
20	49,940	1,3010	1,6984

Fuente: elaboración propia.

- Plotear las columnas LogH contra LogQ.
- Generar una línea de tendencia que mejor se ajuste al conjunto de datos ploteados y obtener su ecuación.



Figura 44. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 44 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8626X + 0,7074$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

$$\text{Siendo } n = 1,8626 \text{ y } k = \text{Log}^{-1}(-0,7074) = 0,1961$$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 44 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,1961 * H^{1,8626}$$

Donde:

- $Q_{\text{exp}}$ : caudal generado, en litros por segundo
- H: altura en centímetros

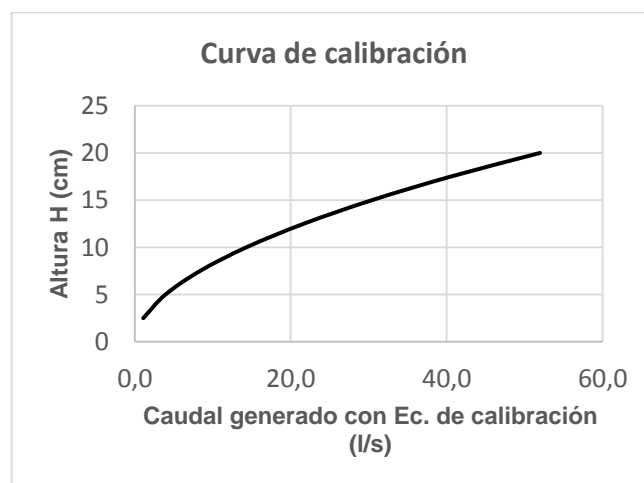
Con la ecuación de calibración obtenida, se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, para luego estimar el porcentaje de error entre ambos datos y generar la curva de calibración del vertedero.

Tabla V. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración, con diámetro de 44 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q generado con Ec. Calibración (l/s) $Q=0,1961 \cdot H^{1,8626}$	Error %
2,5	1,082	1,0809	0 %
5	3,947	3,9310	0 %
7,5	8,285	8,3654	1 %
10	14,177	14,2955	1 %
12,5	21,655	21,6623	0 %
15	30,541	30,4220	0 %
17,5	42,563	40,5399	5 %
20	49,940	51,9874	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Curva de calibración, con diámetro de 44 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2.1. Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 44 cm

Para corregir las ecuaciones teóricas es necesario aplicar un coeficiente de descarga, el cual permitirá obtener resultados más confiables.

$$Q_{\text{real}} = Cd * Q_{\text{teórico}}$$

Stauss – Von Sanden presenta la siguiente ecuación para hallar el caudal teórico:

$$Q_{\text{teórico}} = \phi D^{5/2}$$
$$\phi = 3,203 \left(\frac{H}{D}\right)^{1,975} - 0,842 \left(\frac{H}{D}\right)^{3,78}$$
$$Q_{\text{real}} = Cd * \left[ \left( 3,203 \left(\frac{H}{D}\right)^{1,975} - 0,842 \left(\frac{H}{D}\right)^{3,78} \right) * D^{5/2} \right]$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- $\phi$ : función de h/D en m<sup>1/2</sup>/s
- D: diámetro del vertedero en m
- H: carga del vertedero, en m

Sustituyendo  $\phi$ , agregando el coeficiente de descarga y haciendo la conversión se tiene:

$$Q_{\text{Real}} = Cd * 0,01 \left[ \left( 3,203 \left(\frac{H}{D}\right)^{1,975} - 0,842 \left(\frac{H}{D}\right)^{3,78} \right) * D^{5/2} \right]$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm
- Cd: coeficiente de descarga, adimensional

Para encontrar el coeficiente de descarga se realizan los siguientes pasos:

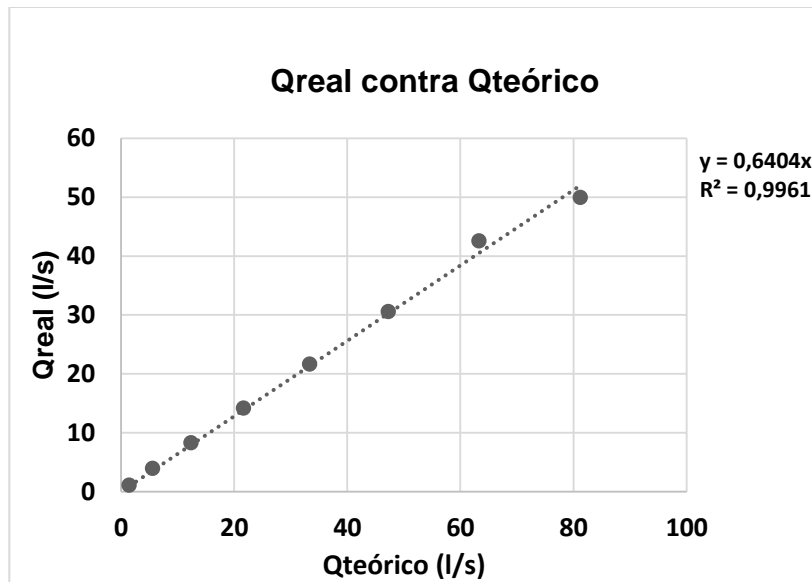
- Calcular los caudales teóricos para las mismas H, de los caudales observados en laboratorio.
- Plotear  $Q_{\text{teórico}}$  contra  $Q_{\text{observado}}$ .
- Los puntos ploteados definen una recta, la cual se ajusta por el método de mínimos cuadrados; la pendiente de dicha recta representará el coeficiente de descarga buscado.

Tabla VI. **Caudales observados y teóricos, con diámetro de 44 cm**

H (cm)	$Q_{\text{observado}}$ V/t (l/s)	$Q_{\text{teórico}}$ (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2,5	1,082	1,4245	32 %
5	3,947	5,5793	41 %
7,5	8,285	12,3568	49 %
10	14,177	21,6484	53 %
12,5	21,655	33,3294	54 %
15	30,541	47,2571	55 %
17,5	42,563	63,2698	49 %
20	49,940	81,1868	63 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 44 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,6404$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,6404 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 6,404 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla VII. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos, con diámetro de 44 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden corregida	Error %
2,5	1,082	0,9122	16 %
5	3,947	3,5730	9 %
7,5	8,285	7,9133	4 %
10	14,177	13,8636	2 %
12,5	21,655	21,3441	1 %
15	30,541	30,2635	1 %
17,5	42,563	40,5180	5 %
20	49,940	51,9920	4 %

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta, con diámetro de 44 cm

El *Manual de hidráulica* presenta la ecuación propuesta por José de Azevedo y Guillermo Acosta, la cual está definida de la siguiente manera:

$$Q_{teórico} = 1,518D^{0,693}H^{1,807}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- H: carga de agua, en m
- D: diámetro del vertedero, en m

Haciendo la conversión y agregando el coeficiente de descarga se tiene:

$$Q_{Real} = Cd * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- H: carga de agua, en cm
- D: diámetro del vertedero, en cm
- Cd: coeficiente de descarga adimensional

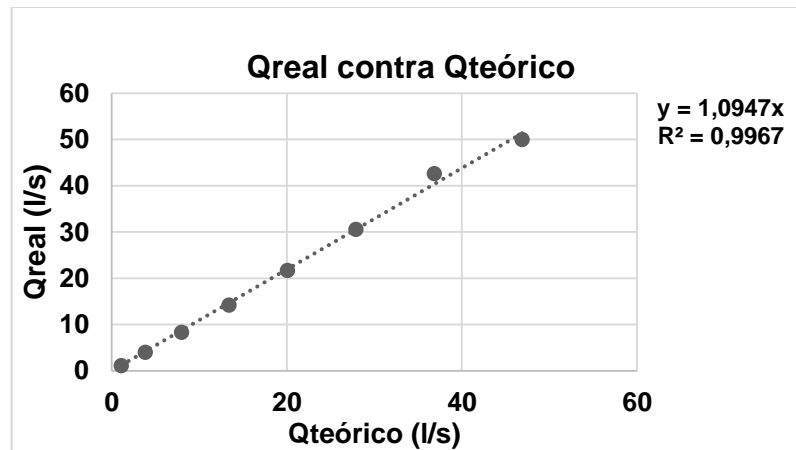
Para encontrar el coeficiente de descarga se realiza el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniendo los siguientes resultados.

Tabla VIII. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 44 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Manual de Hidráulica	Error %
2,5	1,082	1,0946	1 %
5	3,947	3,8302	3 %
7,5	8,285	7,9693	4 %
10	14,177	13,4025	5 %
12,5	21,655	20,0586	7 %
15	30,541	27,8857	9 %
17,5	42,563	36,8429	13 %
20	49,940	46,8971	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Determinación del coeficiente de descarga con diámetro de 44 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0947$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0947 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 16,6175 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$



Tabla IX. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 44 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de Hidráulica corregida	Error %
2,5	1,082	1,1983	11 %
5	3,947	4,1929	6 %
7,5	8,285	8,7240	5 %
10	14,177	14,6717	3 %
12,5	21,655	21,9582	1 %
15	30,541	30,5265	0 %
17,5	42,563	40,3320	5 %
20	49,940	51,3382	3 %

Fuente: elaboración propia

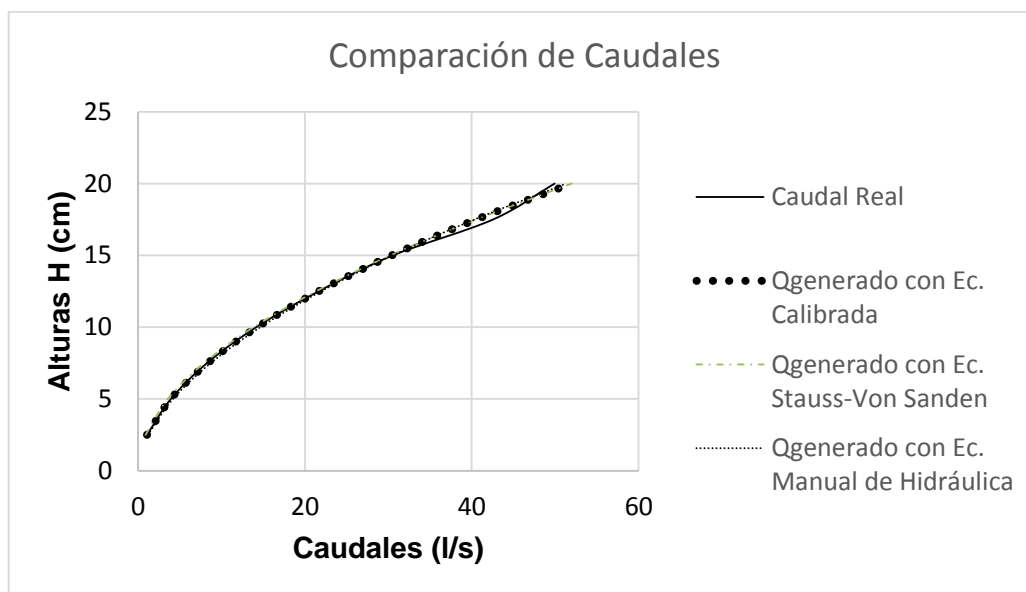
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla X. **Comparación de caudales con diámetro de 44 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. De Calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden Corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de Hidráulica Corregida
2,5	1,082	1,081	0,9122	1,1983
5	3,947	3,931	3,5730	4,1929
7,5	8,285	8,365	7,9133	8,7240
10	14,177	14,296	13,8636	14,6717
12,5	21,655	21,662	21,3441	21,9582
15	30,541	30,422	30,2635	30,5265
17,5	42,563	40,540	40,5180	40,3320
20	49,940	51,987	51,9920	51,3382

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Comparación de caudales, con diámetro de 44 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Calibración de vertedero circular de diámetro 40 cm

El ensayo, para este vertedero sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XI. **Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 40 cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,5	202,6	198,7581	198	200,989	197,122	193,180
5	53,48	189,8329	55,67	196,527	53,6	189,833
7,5	21,41	165,2886	22,19	171,982	22,88	176,445
10	16,17	221,0711	15,73	215,493	15,65	214,377
12,5	11,99	243,3841	12,22	247,847	11,73	237,806
15	9,42	276,8536	9,19	270,160	9,41	276,854

Continuación de la tabla XII.

17,5	12,77	499,9836	12,89	504,446	13,06	511,140
20	11,51	533,4531	11,82	547,957	11,41	528,990

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.3.2., se calcularon los caudales observados.

Tabla XII. **Caudales observados con vertedero circular de diámetro 40 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2,5	0,981	1,015	0,980	0,992
5	3,550	3,530	3,542	3,540
7,5	7,720	7,750	7,712	7,727
10	13,672	13,699	13,698	13,690
12,5	20,299	20,282	20,273	20,285
15	29,390	29,397	29,421	29,403
17,5	39,153	39,135	39,138	39,142
20	46,347	46,358	46,362	46,356

Fuente: elaboración propia.

- Logaritmos de caudales reales y alturas H:

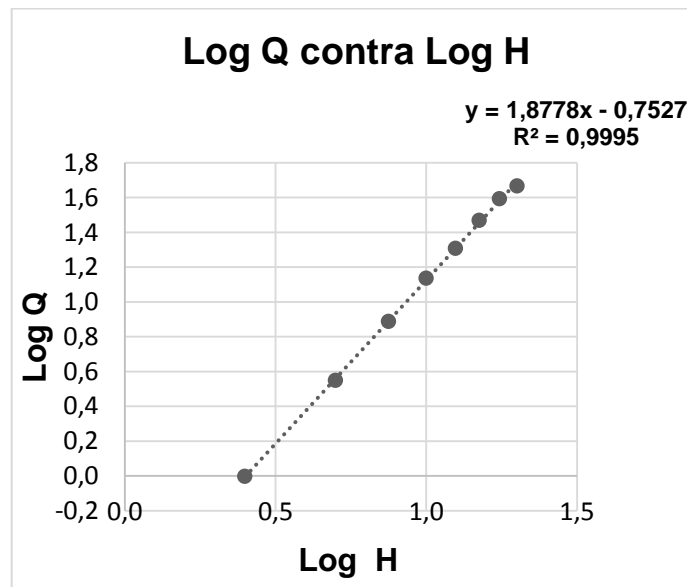
Tabla XIII. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 40 cm**

H (cm)	Qr (l/s)	Log H	Log Q
2,5	0,992	0,3979	-0,0035
5	3,540	0,6990	0,5491
7,5	7,727	0,8751	0,8880
10	13,690	1,0000	1,1364
12,5	20,285	1,0969	1,3072
15	29,403	1,1761	1,4684
17,5	39,142	1,2430	1,5926
20	46,356	1,3010	1,6661

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica LogH contra LogQ

Figura 49. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 40 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8778X - 0,7527$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

Siendo  $n = 1,8778$  y  $k = \text{Log}^{-1}(-0,7527) = 0,1767$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 40 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,1767 \cdot H^{1,8778}$$

Donde:

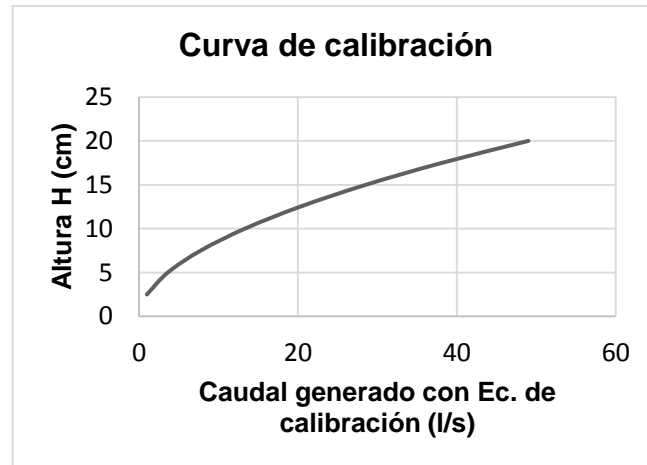
- $Q_{exp}$ : caudal generado, en litros por segundo
  - H: altura en centímetros
- Comparación de caudales observados en laboratorio con los generados con la ecuación de calibración.

Tabla XIV. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 40 cm**

H (cm)	$Q_{observado}$ V/t (l/s)	Q generado con Ec. calibración (l/s) $Q=0,1767 \cdot H^{1,8778}$	Error %
2,5	0,992	0,9875	0 %
5	3,540	3,6293	3 %
7,5	7,727	7,7712	1 %
10	13,690	13,3383	3 %
12,5	20,285	20,2805	0 %
15	29,403	28,5604	3 %
17,5	39,142	38,1484	3 %
20	46,356	49,0201	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Curva de calibración, con diámetro de 40 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3.1. **Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 40 cm**

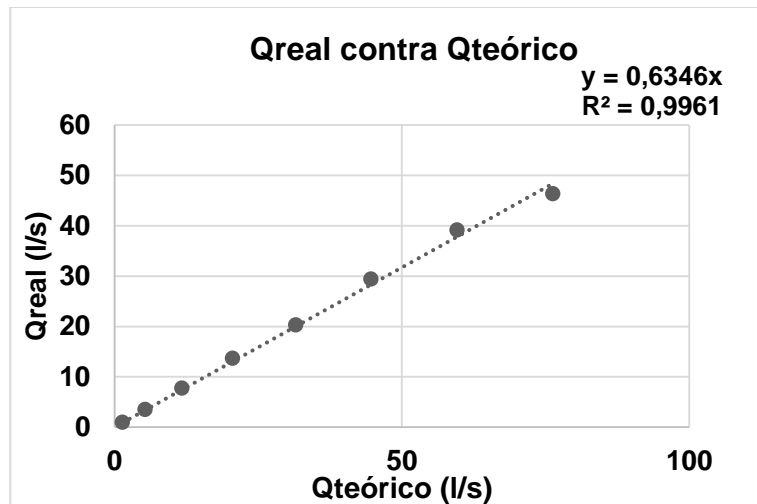
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XV. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 40 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2,5	0,992	1,3546	37 %
5	3,540	5,3018	50 %
7,5	7,727	11,7297	52 %
10	13,690	20,5204	50 %
12,5	20,285	31,5368	55 %
15	29,403	44,6202	52 %
17,5	39,142	59,5900	52 %
20	46,356	76,2441	64 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 40 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,6346$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,6346 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 6,346 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla XVI. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 40 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden corregida	Error %
2,5	0,992	0,8596	13 %
5	3,540	3,3645	5 %
7,5	7,727	7,4436	4 %
10	13,690	13,0223	5 %
12,5	20,285	20,0133	1 %
15	29,403	28,3160	4 %
17,5	39,142	37,8158	3 %
20	46,356	48,3845	4 %

Fuente: elaboración propia.

### **3.3.3.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 40 cm**

Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.2., obteniendo los siguientes resultados.

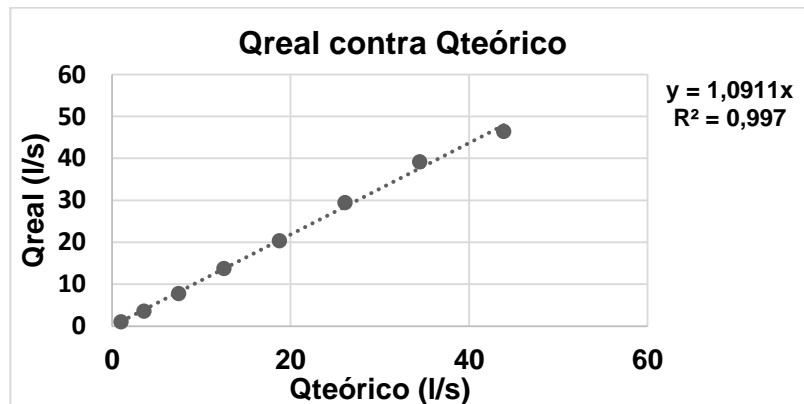


Tabla XVII. Caudales observados y teóricos con diámetro de 40 cm

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	0,992	1,0247	3 %
5	3,540	3,5854	1 %
7,5	7,727	7,4599	3 %
10	13,690	12,5458	8 %
12,5	20,285	18,7765	7 %
15	29,403	26,1034	11 %
17,5	39,142	34,4881	12 %
20	46,356	43,8996	5 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 40 cm



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0911$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0911 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 16,5629 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Tabla XVIII. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 40 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida	Error %
2,5	0,992	1,1180	13 %
5	3,540	3,9120	10 %
7,5	7,727	8,1395	5 %
10	13,690	13,6888	0 %
12,5	20,285	20,4871	1 %
15	29,403	28,4814	3 %
17,5	39,142	37,6300	4 %
20	46,356	47,8989	3 %

Fuente: elaboración propia.

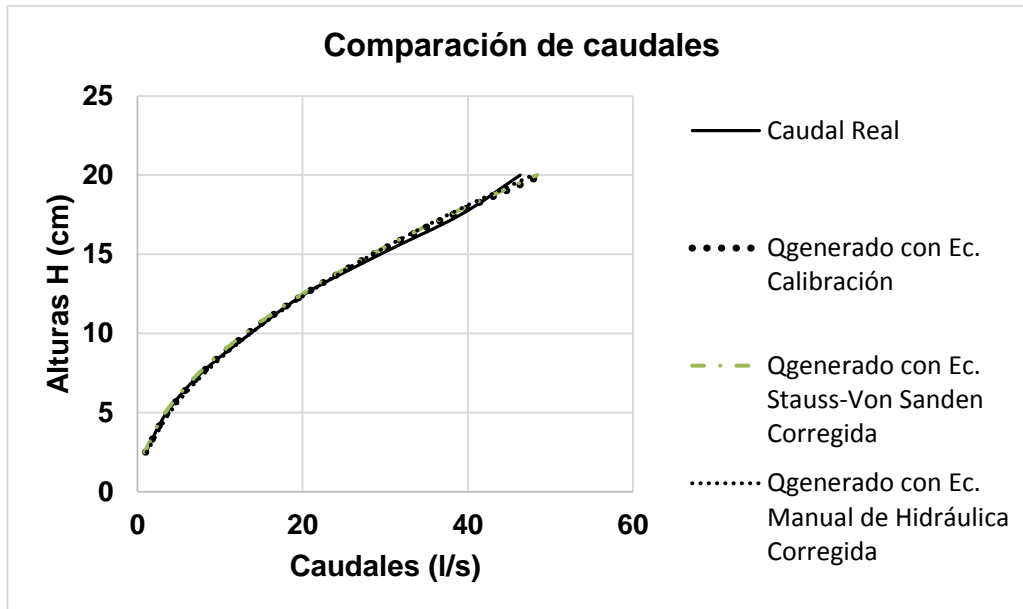
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla XIX. **Comparación de caudales, con diámetro de 40 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. de calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida
2,5	0,992	0,988	0,8596	1,1180
5	3,540	3,629	3,3645	3,9120
7,5	7,727	7,771	7,4436	8,1395
10	13,690	13,338	13,0223	13,6888
12,5	20,285	20,280	20,0133	20,4871
15	29,403	28,560	28,3160	28,4814
17,5	39,142	38,148	37,8158	37,6300
20	46,356	49,020	48,3845	47,8989

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Comparación de caudales con diámetro de 40 cm



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4. Calibración de vertedero circular de diámetro 35 cm

El ensayo, para este vertedero, sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XX. Datos obtenidos con vertedero circular con diámetro de 35 cm

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,5	184,31	169,7512	179,85	170,867	173,46	163,057
5	43,61	165,2886	46,61	171,982	46,94	170,867
7,5	30,69	227,7650	29,00	214,377	29,08	215,493
10	18,76	228,8806	18,19	222,187	17,90	218,840

Continuación de la tabla XXI.

12,5	16,64	301,3979	16,6	300,282	16,34	295,820
15	10,9	284,6631	10,93	285,779	10,94	285,779
17,5	10,03	340,4456	9,67	329,289	9,61	325,942
20	8,98	386,1873	10,58	454,820	10,08	433,045

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.3.2., se calcularon los caudales observados.

Tabla XXI. **Caudales observados con vertedero circular con de diámetro 35 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2,5	0,921	0,950	0,940	0,937
5	3,790	3,690	3,640	3,707
7,5	7,421	7,392	7,410	7,408
10	12,200	12,215	12,226	12,214
12,5	18,113	18,089	18,104	18,102
15	26,116	26,146	26,122	26,128
17,5	33,943	34,053	33,917	33,971
20	43,005	42,989	42,961	42,985

Fuente: elaboración propia.

- Logaritmos de caudales reales y alturas H:

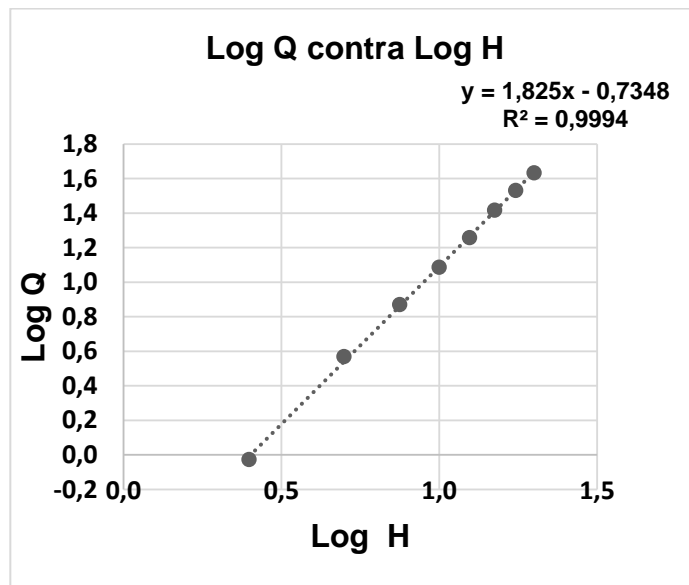
Tabla XXII. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con de diámetro de 35 cm**

H (cm)	Qr (l/s)	Log H	Log Q
2,5	0,937	0,3979	-0,0282
5	3,707	0,6990	0,5690
7,5	7,408	0,8751	0,8697
10	12,214	1,0000	1,0868
12,5	18,102	1,0969	1,2577
15	26,128	1,1761	1,4171
17,5	33,971	1,2430	1,5311
20	42,985	1,3010	1,6333

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica LogH contra LogQ

Figura 54. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 35 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,825X - 0,7348$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

Siendo  $n = 1,825$  y  $k = \text{Log}^{-1}(-0,7348) = 0,1841$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 40 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,1841 * H^{1,825}$$

Donde:

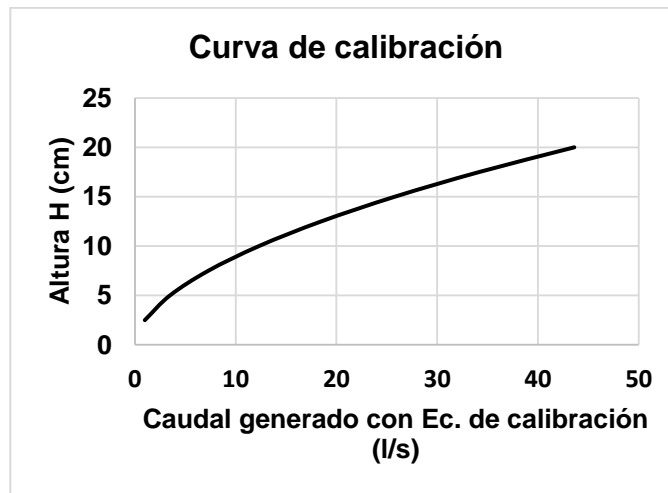
- $Q_{exp}$ : caudal generado, en litros por segundo
  - H: altura en centímetros
- Comparación de caudales observados en laboratorio con los generados con la ecuación de calibración.

Tabla XXIII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 35 cm**

H (cm)	$Q_{observado}$ V/t (l/s)	Q generado con Ec. Calibración (l/s) $Q=0,1841 \cdot H^{1,825}$	Error %
2,5	0,937	0,9805	5 %
5	3,707	3,4739	6 %
7,5	7,408	7,2809	2 %
10	12,214	12,3084	1 %
12,5	18,102	18,4953	2 %
15	26,128	25,7968	1 %
17,5	33,971	34,1778	1 %
20	42,985	43,6094	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Curva de calibración, con diámetro de 35 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4.1. **Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 35 cm**

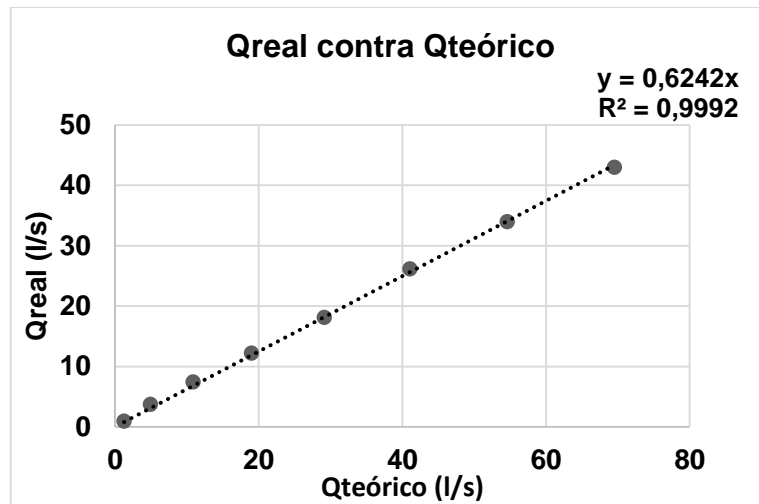
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XXIV. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 35 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2,5	0,937	1,2623	35 %
5	3,707	4,9345	33 %
7,5	7,408	10,8969	47 %
10	12,214	19,0164	56 %
12,5	18,102	29,1350	61 %
15	26,128	41,0680	57 %
17,5	33,971	54,6042	61 %
20	42,985	69,5060	62 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 35 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,6242$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,6242 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 6,242 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$



Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla XXV. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 35 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden corregida	Error %
2,5	0,937	0,7879	16 %
5	3,707	3,0801	17 %
7,5	7,408	6,8018	8 %
10	12,214	11,8700	3 %
12,5	18,102	18,1861	0 %
15	26,128	25,6347	2 %
17,5	33,971	34,0839	0 %
20	42,985	43,3857	1 %

Fuente: elaboración propia.

### **3.3.4.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 35 cm**

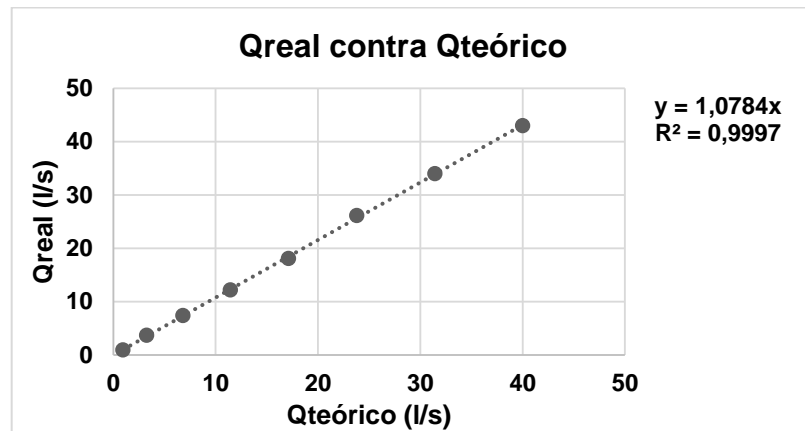
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.2., obteniendo los siguientes resultados:

Tabla XXVI. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 35 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Manual de Hidráulica	Error %
2,5	0,937	0,9341	0 %
5	3,707	3,2685	12 %
7,5	7,408	6,8006	8 %
10	12,214	11,4370	6 %
12,5	18,102	17,1170	5 %
15	26,128	23,7962	9 %
17,5	33,971	31,4399	7 %
20	42,985	40,0195	7 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 35 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0784$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0784 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 16,37 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Tabla XXVII. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 35 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de Hidráulica corregida	Error %
2,5	0,937	1,0073	8 %
5	3,707	3,5248	5 %
7,5	7,408	7,3338	1 %
10	12,214	12,3336	1 %
12,5	18,102	18,4590	2 %
15	26,128	25,6618	2 %
17,5	33,971	33,9048	0 %
20	42,985	43,1571	0 %

Fuente: elaboración propia.

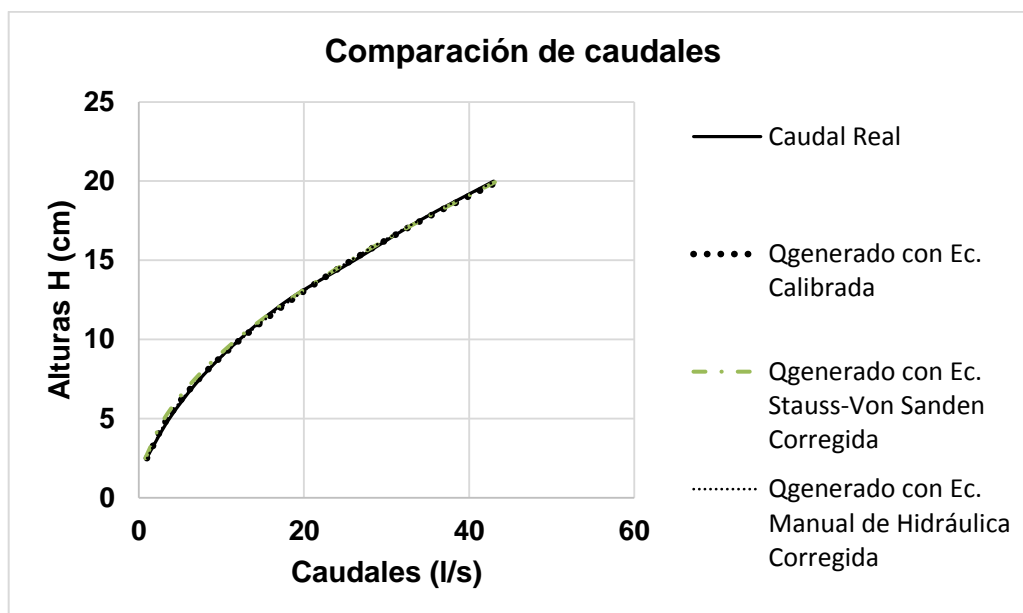
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla XXVIII. **Comparación de caudales, con diámetro de 35 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. de calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida
2,5	0,937	0,980	0,7879	1,0073
5	3,707	3,474	3,0801	3,5248
7,5	7,408	7,281	6,8018	7,3338
10	12,214	12,308	11,8700	12,3336
12,5	18,102	18,495	18,1861	18,4590
15	26,128	25,797	25,6347	25,6618
17,5	33,971	34,178	34,0839	33,9048
20	42,985	43,609	43,3857	43,1571

Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Comparación de caudales, con diámetro de 35 cm**



Fuente: elaboración propia

### 3.3.5. Calibración de vertedero circular de diámetro 30 cm

El ensayo, para este vertedero, sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XXIX. **Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 30 cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,5	264,01	214,3772	268,62	221,071	260,57	215,493
5	65,04	193,1798	67,22	200,989	63,7	189,833
7,5	30,85	196,5268	30,37	193,180	31,25	198,758
10	25,44	276,8536	24,87	270,160	26,34	285,779

Continuación de la tabla XXX.

12,5	14,84	243,3841	15,08	247,847	14,51	237,806
15	14,87	340,4456	16,84	386,187	14,61	334,867
17,5	11,02	334,8674	10,91	331,520	12,71	386,187
20	8,72	334,8674	9,58	368,337	10,06	386,187

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.3.2., se calcularon los caudales observados.

Tabla XXX. **Caudales observados con vertedero circular de diámetro 30 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2,5	0,812	0,823	0,827	0,821
5	2,970	2,990	2,980	2,980
7,5	6,370	6,361	6,360	6,364
10	10,883	10,863	10,850	10,865
12,5	16,401	16,435	16,389	16,408
15	22,895	22,933	22,920	22,916
17,5	30,387	30,387	30,385	30,386
20	38,402	38,449	38,388	38,413

Fuente: elaboración propia.

- Logaritmos de caudales reales y alturas H:

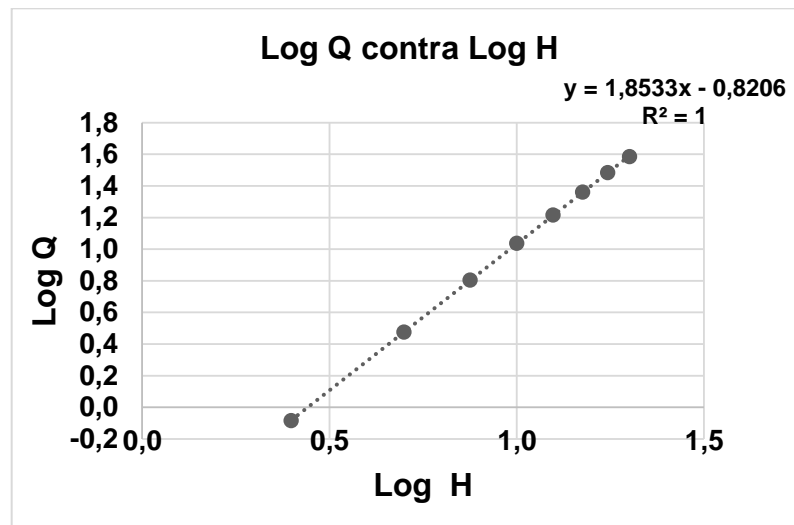
Tabla XXXI. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 30 cm**

H (cm)	Qr (l/s)	Log H	Log Q
2,5	0,821	0,3979	-0,0858
5	2,980	0,6990	0,4742
7,5	6,364	0,8751	0,8037
10	10,865	1,0000	1,0360
12,5	16,408	1,0969	1,2151
15	22,916	1,1761	1,3601
17,5	30,386	1,2430	1,4827
20	38,413	1,3010	1,5845

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica LogH contra LogQ

Figura 59. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 30 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8533X - 0,8206$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

$$\text{Siendo } n = 1,8533 \text{ y } k = \text{Log}^{-1}(-0,8206) = 0,1511$$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 40 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,1511 * H^{1,8533}$$

Donde:

- $Q_{\text{exp}}$ : caudal generado, en litros por segundo

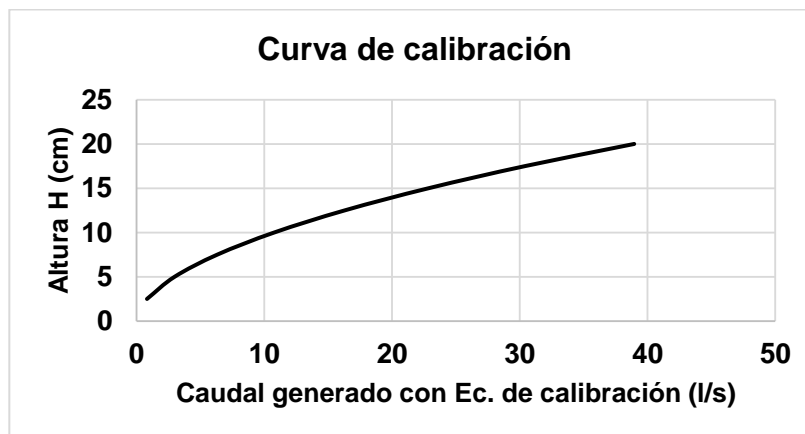
- H: altura en centímetros
- Comparación de caudales observados en laboratorio con los generados con la ecuación de calibración.

Tabla XXXII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 30 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q generado con Ec. Calibración (l/s) $Q=0,1511 \cdot H^{1,8533}$	Error %
2,5	0,821	0,8259	1 %
5	2,980	2,9842	0 %
7,5	6,364	6,3267	1 %
10	10,865	10,7828	1 %
12,5	16,408	16,3056	1 %
15	22,916	22,8605	0 %
17,5	30,386	30,4200	0 %
20	38,413	38,9617	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Curva de calibración, con diámetro de 30 cm**



Fuente: elaboración propia

### 3.3.5.1. Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 30 cm

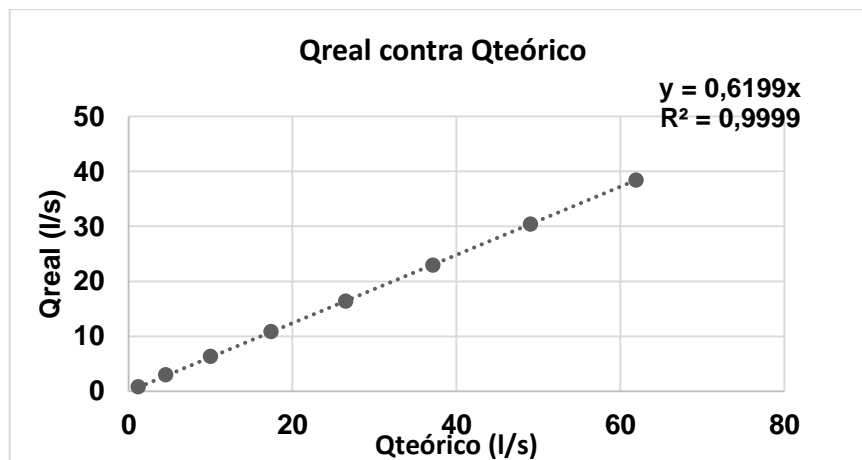
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla XXXIII. Caudales observados y teóricos, con diámetro de 30 cm

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2,5	0,821	1,1633	42 %
5	2,980	4,5393	52 %
7,5	6,364	9,9963	57 %
10	10,865	17,3795	60 %
12,5	16,408	26,5016	62 %
15	22,916	37,1415	62 %
17,5	30,386	49,0450	61 %
20	38,413	61,9254	61 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Determinación del coeficiente de descarga con diámetro de 30 cm



Fuente: elaboración propia.



De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,6199$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,6199 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 6,199 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla XXXIV. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 30 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden corregida	Error %
2,5	0,821	0,7211	12 %
5	2,980	2,8139	6 %
7,5	6,364	6,1967	3 %
10	10,865	10,7736	1 %
12,5	16,408	16,4283	0 %
15	22,916	23,0240	0 %
17,5	30,386	30,4030	0 %
20	38,413	38,3876	0 %

Fuente: elaboración propia

### 3.3.5.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 30 cm

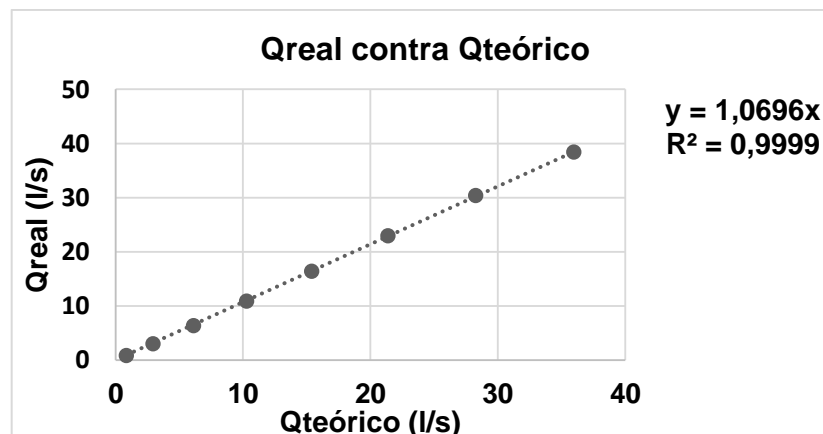
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.2., obteniendo los siguientes resultados:

Tabla XXXV. Caudales observados y teóricos, con diámetro de 30 cm

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	0,821	0,8394	2 %
5	2,980	2,9373	1 %
7,5	6,364	6,1116	4 %
10	10,865	10,2782	5 %
12,5	16,408	15,3827	6 %
15	22,916	21,3852	7 %
17,5	30,386	28,2544	7 %
20	38,413	35,9648	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 30 cm



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0696$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0696 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 16,236 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Tabla XXXVI. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 30 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida	Error %
2,5	0,821	0,8979	9 %
5	2,980	3,1418	5 %
7,5	6,364	6,5369	3 %
10	10,865	10,9936	1 %
12,5	16,408	16,4534	0 %
15	22,916	22,8736	0 %
17,5	30,386	30,2209	1 %
20	38,413	38,4680	0 %

Fuente: elaboración propia.

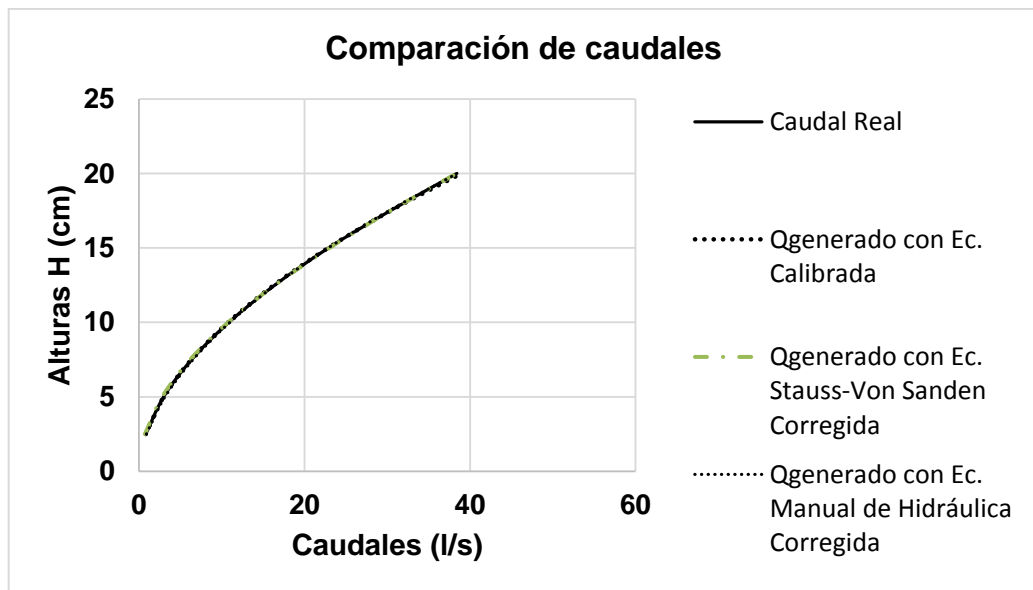
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla XXXVII. **Comparación de caudales con diámetro de 30 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. De Calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida
2,5	0,821	0,826	0,7211	0,8979
5	2,980	2,984	2,8139	3,1418
7,5	6,364	6,327	6,1967	6,5369
10	10,865	10,783	10,7736	10,9936
12,5	16,408	16,306	16,4283	16,4534
15	22,916	22,860	23,0240	22,8736
17,5	30,386	30,420	30,4030	30,2209
20	38,413	38,962	38,3876	38,4680

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Comparación de caudales, con diámetro de 30 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.6. Calibración de vertedero circular de diámetro 25 cm

El ensayo, para este vertedero, sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XXXVIII. **Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 25 cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,5	232,53	169,7512	220,67	165,289	227,58	168,636
5	71,38	193,1798	70,27	189,833	73,06	198,758
7,5	38,78	221,0711	37,34	214,377	38,32	218,840
10	25,08	237,8058	25,4	243,384	25,92	247,847
12,5	19,48	276,8536	18,94	270,160	19,38	276,854
15	14,78	285,7788	14,75	284,663	15,31	295,820
17,5	13,2	340,4456	12,79	329,289	12,67	325,942
20	13,47	447,5480	13,77	457,589	13,4	445,317

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.3.2., se calcularon los caudales observados.

Tabla XXXIX. **Caudales observados con vertedero circular de diámetro 25 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2,5	0,730	0,749	0,741	0,740
5	2,706	2,701	2,720	2,709
7,5	5,701	5,741	5,711	5,718
10	9,482	9,582	9,562	9,542
12,5	14,212	14,264	14,286	14,254
15	19,336	19,299	19,322	19,319
17,5	25,791	25,746	25,726	25,754
20	33,226	33,231	33,233	33,230

Fuente: elaboración propia.

- Logaritmos de caudales reales y alturas H:

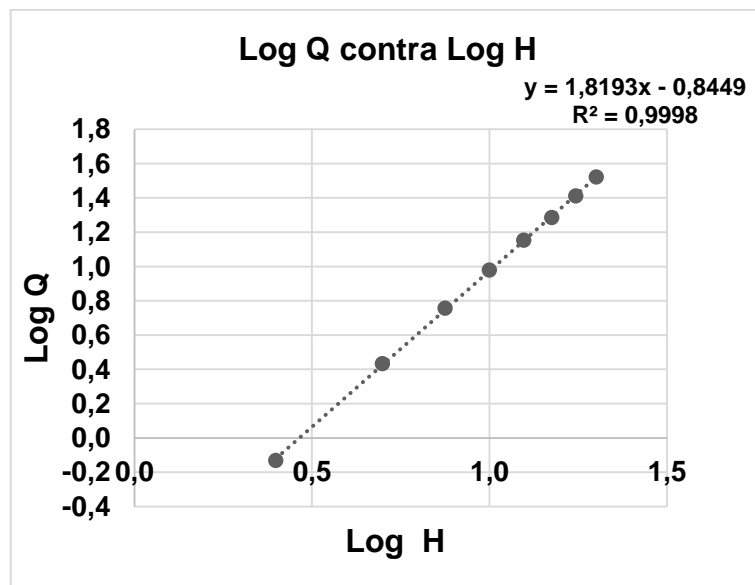
Tabla XL. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 25 cm**

H (cm)	Qr (l/s)	Log H	Log Q
2,5	0,740	0,3979	-0,1308
5	2,709	0,6990	0,4329
7,5	5,718	0,8751	0,7572
10	9,542	1,0000	0,9796
12,5	14,254	1,0969	1,1539
15	19,319	1,1761	1,2860
17,5	25,754	1,2430	1,4108
20	33,230	1,3010	1,5215

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica LogH contra LogQ

Figura 64. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 25 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8193X - 0,8499$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

$$\text{Siendo } n = 1,8193 \text{ y } k = \text{Log}^{-1} (-0,8449) = 0,142922$$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 40 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,142922 * H^{1,8193}$$

Donde:

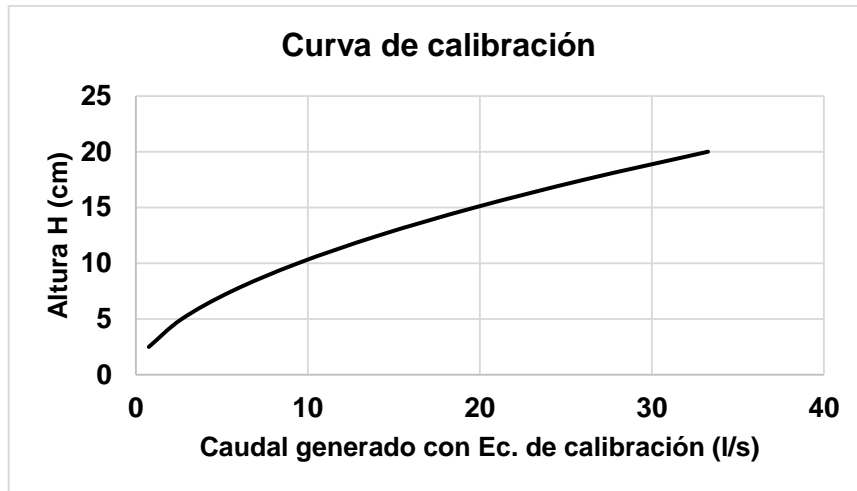
- $Q_{\text{exp}}$ : caudal generado, en litros por segundo.
- H: altura en centímetros.
- Comparación de caudales observados en laboratorio con los generados con la ecuación de calibración.

Tabla XLI. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 25 cm**

H (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	Q generado con Ec. calibración (l/s) $Q=0,142922 * H^{1,8193}$	Error %
2,5	0,740	0,7570	2 %
5	2,709	2,6714	1 %
7,5	5,718	5,5860	2 %
10	9,542	9,4276	1 %
12,5	14,254	14,1484	1 %
15	19,319	19,7135	2 %
17,5	25,754	26,0951	1 %
20	33,230	33,2708	0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **Curva de calibración, con diámetro de 25 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.6.1. **Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 25 cm**

Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniéndose los siguientes resultados:

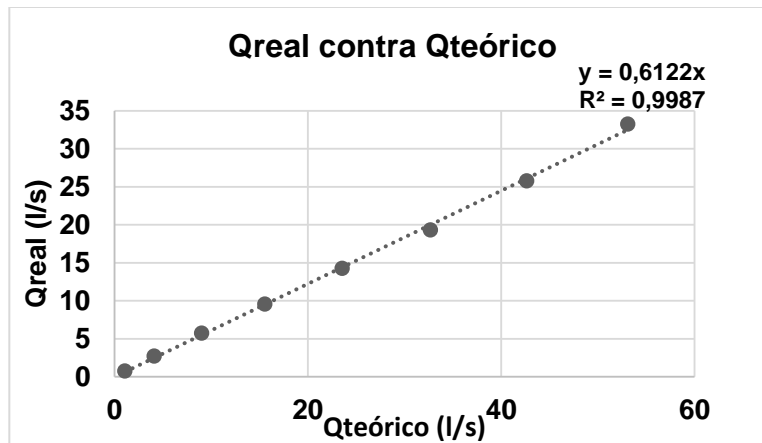
Tabla XLII. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 25 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2,5	0,740	1,0559	43 %
5	2,709	4,1081	52 %
7,5	5,718	9,0059	58 %
10	9,542	15,5621	63 %
12,5	14,254	23,5454	65 %
15	19,319	32,6812	69 %
17,5	25,754	42,6519	66 %
20	33,230	53,0985	60 %

Fuente: elaboración propia.



Figura 66. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 25 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,6122$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,6122 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 6,122 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla XLIII. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 25 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden Corregida	Error %
2,5	0,740	0,6464	13 %
5	2,709	2,5150	7 %
7,5	5,718	5,5134	4 %
10	9,542	9,5271	0 %
12,5	14,254	14,4145	1 %
15	19,319	20,0074	4 %
17,5	25,754	26,1115	1 %
20	33,230	32,5069	2 %

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.6.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 25 cm

Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.2., obteniendo los siguientes resultados:

Tabla XLIV. **Caudales observados y teóricos con diámetro de 25 cm**

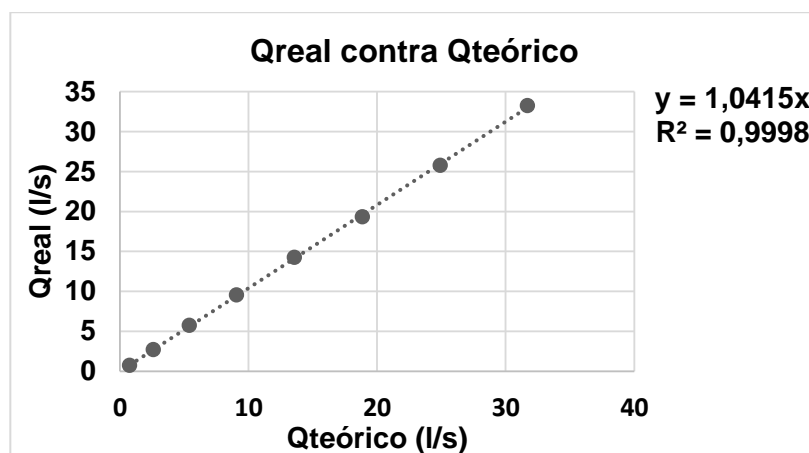
H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de Hidráulica	Error %
2,5	0,740	0,7398	0 %
5	2,709	2,5887	4 %
7,5	5,718	5,3862	6 %

Continuación de la tabla XLV.

10	9,542	9,0582	5 %
12,5	14,254	13,5569	5 %
15	19,319	18,8470	2 %
17,5	25,754	24,9008	3 %
20	33,230	31,6961	5 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 67. **Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 25 cm**



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0415$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0415 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 15,8099 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Tabla XLV. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 25 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de Hidráulica Corregida	Error %
2,5	0,740	0,7705	4 %
5	2,709	2,6961	0 %
7,5	5,718	5,6097	2 %
10	9,542	9,4342	1 %
12,5	14,254	14,1195	1 %
15	19,319	19,6291	2 %
17,5	25,754	25,9342	1 %
20	33,230	33,0115	1 %

Fuente: elaboración propia.

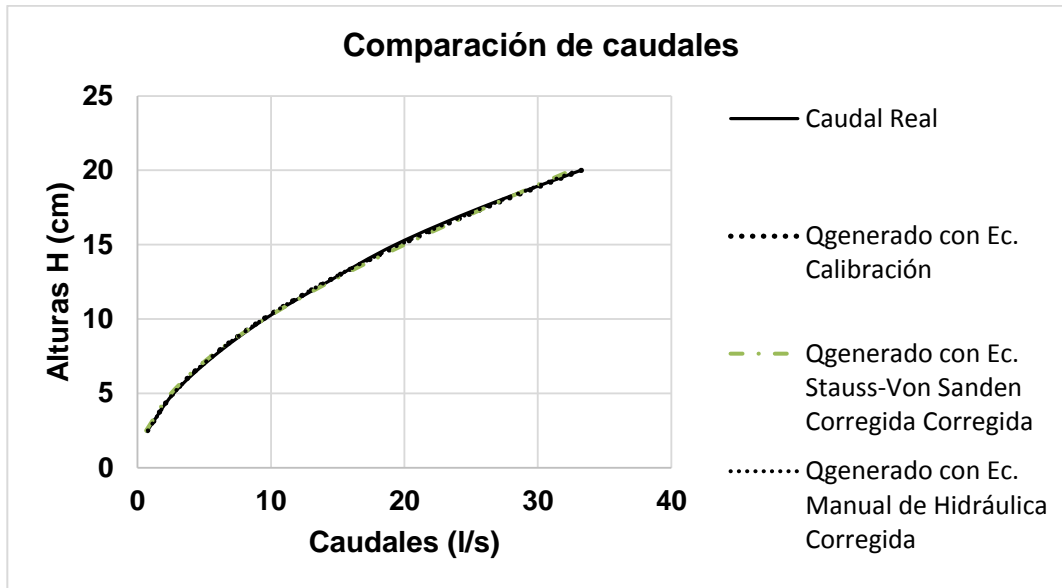
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla XLVI. **Comparación de caudales con diámetro de 25 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. de calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida
2,5	0,740	0,757	0,6464	0,7705
5	2,709	2,671	2,5150	2,6961
7,5	5,718	5,586	5,5134	5,6097
10	9,542	9,428	9,5271	9,4342
12,5	14,254	14,148	14,4145	14,1195
15	19,319	19,713	20,0074	19,6291
17,5	25,754	26,095	26,1115	25,9342
20	33,230	33,271	32,5069	33,0115

Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Comparación de caudales con diámetro de 25 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.7. **Calibración de vertedero circular de diámetro 20 cm**

El ensayo, para este vertedero, sigue el procedimiento descrito en el inciso 3.3.1.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla XLVII. **Datos obtenidos con vertedero circular de diámetro 20 cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2	421,58	168,6355	407,79	170,867	391,02	163,057
4	117,63	176,4451	126,302	189,833	128,95	193,180
6	73,51	227,7650	68,93	214,377	69,51	215,493
8	43,99	228,8806	42,78	222,187	42,02	218,840
10	29,8	237,8058	30,38	243,384	34,34	276,854

Continuación de la tabla XLVIII.

12	22,51	247,8467	22,26	246,731	22,65	248,962
14	19,56	276,8536	18,94	270,160	19,44	276,854
16	15,35	284,6631	15,01	276,854	15,46	285,779

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el procedimiento descrito en el inciso 3.3.2., se calcularon los caudales observados.

Tabla XLVIII. **Caudales observados con vertedero circular de diámetro 20 cm**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
2	0,400	0,419	0,417	0,412
4	1,500	1,503	1,498	1,500
6	3,098	3,110	3,100	3,103
8	5,203	5,194	5,208	5,202
10	7,980	8,011	8,062	8,018
12	11,011	11,084	10,992	11,029
14	14,154	14,264	14,241	14,220
16	18,545	18,445	18,485	18,491

Fuente: elaboración propia.

- Logaritmos de caudales reales y alturas H:

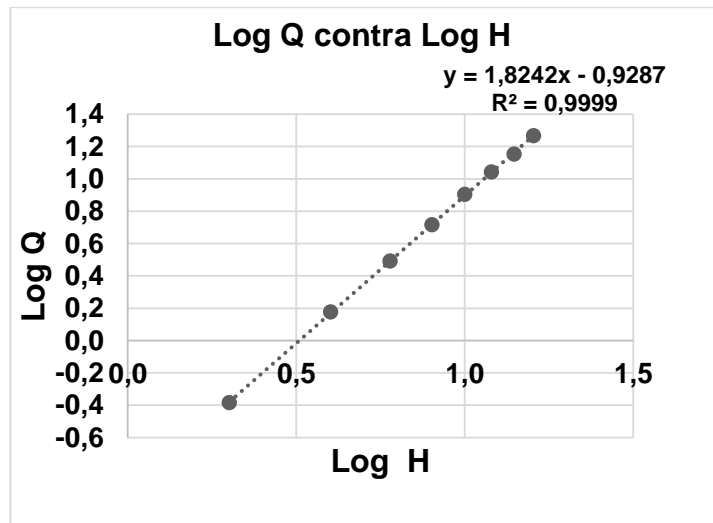
Tabla XLIX. **Logaritmo de caudales observados y de cargas con diámetro de 20 cm**

H (cm)	Qr (l/s)	Log H	Log Q
2	0,412	0,3010	-0,3851
4	1,500	0,6021	0,1762
6	3,103	0,7782	0,4918
8	5,202	0,9031	0,7161
10	8,018	1,0000	0,9041
12	11,029	1,0792	1,0425
14	14,220	1,1461	1,1529
16	18,491	1,2041	1,2670

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica LogH contra LogQ

Figura 69. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H, con diámetro de 20 cm**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8242X - 0,9287$ , de la cual se obtienen los valores de k y n.

$$\text{Siendo } n = 1,8242 \text{ y } k = \text{Log}^{-1}(-0,9287) = 0,1178$$

- Se sustituyen los datos obtenidos para obtener la ecuación específica del vertedero circular ensayado de diámetro 40 cm.

$$Q_{\text{exp}} = 0,1178 * H^{1,8242}$$

Donde:

- $Q_{\text{exp}}$ : caudal generado, en litros por segundo

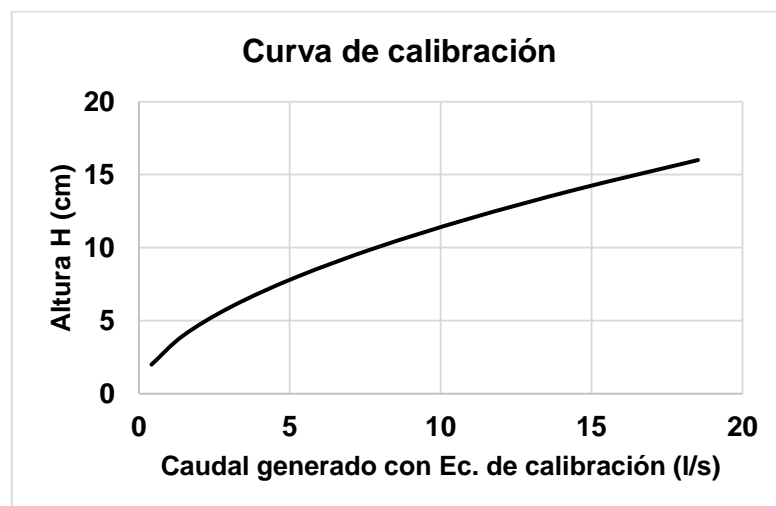
- H: altura en centímetros
- Comparación de caudales observados en laboratorio con los generados con la ecuación de calibración.

Tabla L. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración con diámetro de 20 cm**

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q generado con Ec. calibración (l/s) $Q=0,1178 \cdot H^{1,8242}$	Error %
2,5	0,601	0,5957	1 %
5	2,092	2,1293	2 %
7,5	4,417	4,4855	2 %
10	7,711	7,6103	1 %
12,5	11,603	11,4678	1 %
15	16,461	16,0319	3 %
17,5	21,223	21,2817	0 %
20	26,545	27,2002	2 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Curva de calibración con diámetro de 20 cm**



Fuente: elaboración propia.



### 3.3.7.1. Cálculo del caudal con la ecuación Stauss – Von Sanden con diámetro de 20 cm

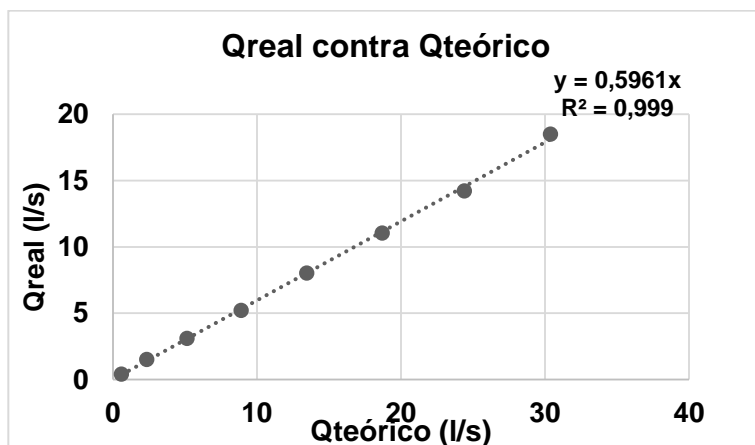
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.1., obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla LI. Caudales observados y teóricos con diámetro de 20 cm

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2	0,412	0,6044	47 %
4	1,500	2,3516	57 %
6	3,103	5,1553	66 %
8	5,202	8,9082	71 %
10	8,018	13,4782	68 %
12	11,029	18,7078	70 %
14	14,220	24,4154	72 %
16	18,491	30,3953	64 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 20 cm



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 0,5961$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 0,5961 * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 5,961 * 10^{-3} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

Tabla LII. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 20 cm**

H (cm)	Q observado V/t (l/s)	Q teóric (l/s) Ec. Stauss - Von Sanden corregida	Error %
2	0,412	0,3603	13 %
4	1,500	1,4018	7 %
6	3,103	3,0731	1 %
8	5,202	5,3102	2 %
10	8,018	8,0343	0 %
12	11,029	11,1517	1 %
14	14,220	14,5540	2 %
16	18,491	18,1187	2 %

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.7.2. Cálculo del caudal con la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta con diámetro de 20 cm

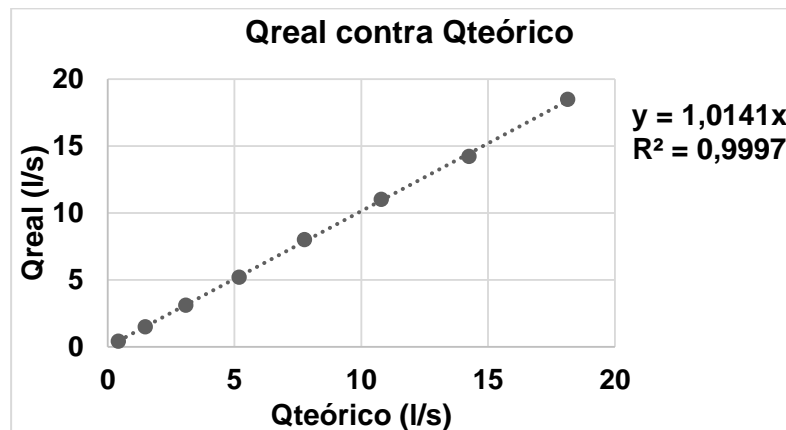
Para encontrar el coeficiente de descarga se siguió el procedimiento indicado en el inciso 3.3.2.2., obteniendo los siguientes resultados:

Tabla LIII. Caudales observados y teóricos con diámetro de 20 cm

H (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>teórico</sub> (l/s) Ec. Manual de hidráulica	Error %
2	0,412	0,4235	3 %
4	1,500	1,4819	1 %
6	3,103	3,0832	1 %
8	5,202	5,1852	0 %
10	8,018	7,7604	3 %
12	11,029	10,7886	2 %
14	14,220	14,2541	0 %
16	18,491	18,1439	2 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Determinación del coeficiente de descarga, con diámetro de 20 cm



Fuente: elaboración propia.

De la ecuación de la recta se obtiene el coeficiente de descarga que es:

$$C_d = 1,0141$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{Real} = 1,0141 * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q_{Real} = 15,394 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Tabla LIV. **Comparación de caudales observados y teóricos corregidos con diámetro de 20 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida	Error %
2	0,412	0,4295	4 %
4	1,500	1,5028	0 %
6	3,103	3,1267	1 %
8	5,202	5,2584	1 %
10	8,018	7,8698	2 %
12	11,029	10,9407	1 %
14	14,220	14,4551	2 %
16	18,491	18,3997	0 %

Fuente: elaboración propia.

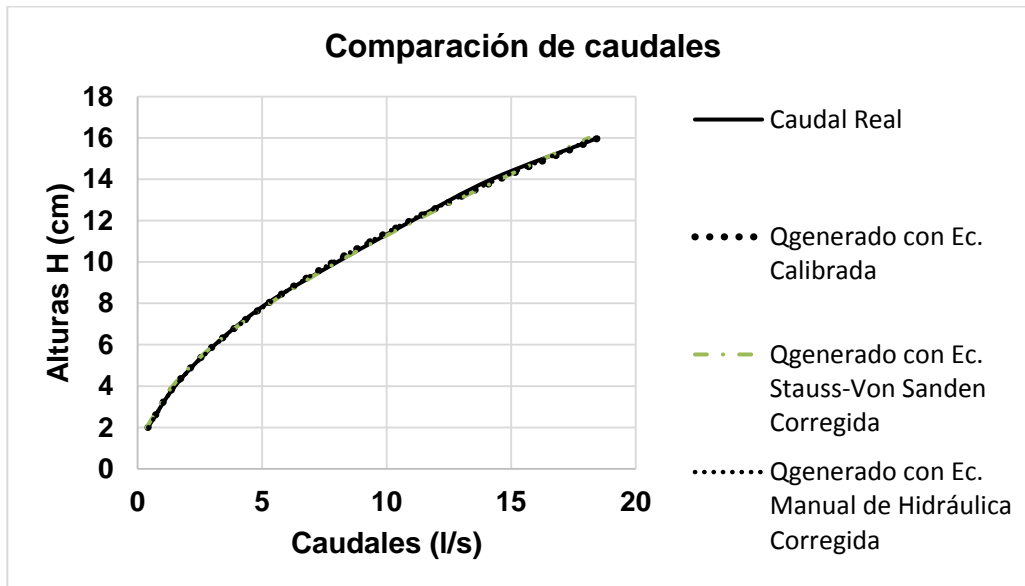
Para finalizar, se comparan los caudales observados en laboratorio, con los obtenidos con la ecuación de calibración y las ecuaciones teóricas corregidas; generando también la gráfica correspondiente.

Tabla LV. **Comparación de caudales con diámetro de 20 cm**

H (cm)	Q Observado V/t (l/s)	Q experimental (l/s) Ec. De calibración	Q teórico (l/s) Ec. Stauss – Von Sanden corregida	Q teórico (l/s) Ec. Manual de hidráulica corregida
2	0,412	0,417	0,3603	0,4295
4	1,500	1,478	1,4018	1,5028
6	3,103	3,096	3,0731	3,1267
8	5,202	5,233	5,3102	5,2584
10	8,018	7,861	8,0343	7,8698
12	11,029	10,963	11,1517	10,9407
14	14,220	14,523	14,5540	14,4551
16	18,491	18,529	18,1187	18,3997

Fuente: elaboración propia.

Figura 73. **Comparación de caudales con diámetro de 20 cm**



Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Obtención de fórmula experimental general

Se observó que los coeficientes de descarga no son constantes para los diferentes diámetros ensayados; por lo cual se determina un modelo

matemático válido para cualquier diámetro a partir de las ecuaciones teóricas y los diferentes coeficientes de descarga obtenidos.

### 3.4.1. Obtención de fórmula experimental general a partir de la ecuación Staus – Von Sanden

El procedimiento para determinar la fórmula experimental general se muestra a continuación. Los datos de los coeficientes de descarga hallados para cada vertedero se muestran en la siguiente tabla.

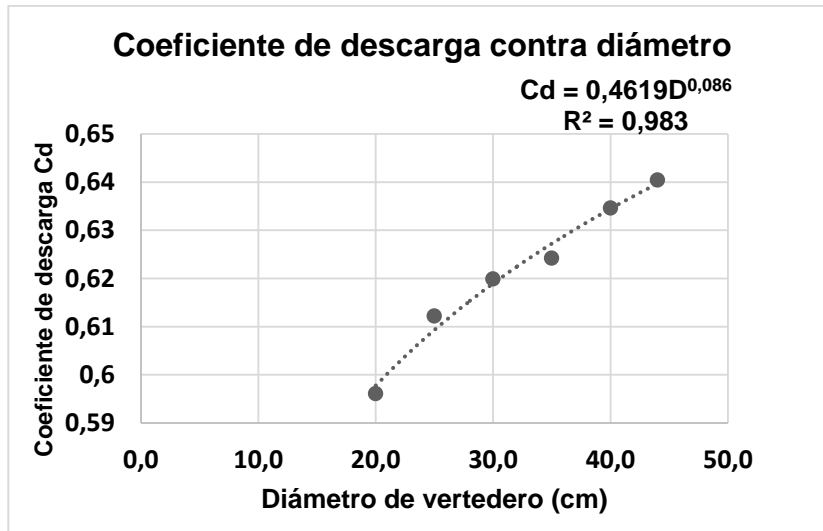
Tabla LVI. **Diámetro de vertedero contra coeficiente de descarga Cd**

Diámetro (cm)	Coficiente de descarga Cd
20	0,5961
25	0,6122
30	0,6199
35	0,6242
40	0,6346
44	0,6404

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se plotean los diferentes diámetros ensayados contra los coeficientes de descarga Cd obtenidos. Se agrega una línea de tendencia potencial, obteniendo de esta manera la ecuación de los coeficientes de descarga para un determinado diámetro.

Figura 74. Base contra coeficientes de descarga Cd



Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático corregido para determinar el caudal en función del diámetro y la altura de la carga, a partir de la fórmula de Stauss – Von Sanden, queda de la siguiente manera:

$$Q = Cd * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Donde según la gráfica anterior Cd es:

$$Cd = 0,4619 * D^{0,086}$$

Sustituyendo el valor de Cd, la ecuación experimental general queda de la siguiente manera:

$$Q = 0,4619 * D^{0,086} * 0,01 \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right] * D^{5/2}$$

Operando:

$$Q = 4,619 * 10^{-3} * D^{2,586} * \left[ 3,203 \left( \frac{H}{D} \right)^{1,975} - 0,842 \left( \frac{H}{D} \right)^{3,78} \right]$$

Donde:

- Q: caudal real, en l/s
- D: diámetro del vertedero, en cm
- H: altura observada, en cm

### 3.4.2. Obtención de fórmula experimental general a partir de la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta

El procedimiento para determinar la fórmula experimental general es el mismo explicado en el inciso 3.4.1. Los datos de los coeficientes de descarga hallados para cada vertedero se muestran en la siguiente tabla:

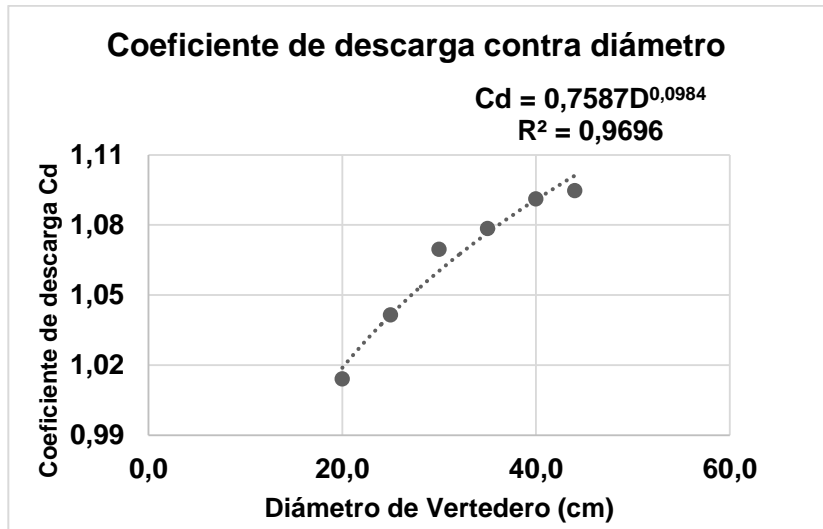
Tabla LVII. **Diámetro de vertedero contra coeficiente de descarga Cd**

Diámetro (cm)	Coficiente de descarga Cd
20	1,0141
25	1,0415
30	1,0696
35	1,0784
40	1,0911
44	1,0947

Fuente: elaboración propia.



Figura 75. Base contra coeficientes de descarga Cd



Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático corregido para determinar el caudal en función del diámetro y la altura de la carga, a partir de la fórmula propuesta por Azevedo y Acosta en el *Manual de hidráulica*, queda de la siguiente manera:

$$Q = Cd * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Donde según la gráfica anterior Cd es:

$$Cd = 0,7587 * D^{0,0984}$$

Sustituyendo el valor de Cd, la ecuación experimental general queda de la siguiente manera:

$$Q = 0,7587 * D^{0,0984} * 15,18 * 10^{-3} * D^{0,693} H^{1,807}$$

Operando:

$$Q = 11,517 * 10^{-3} * D^{0,7914} H^{1,807}$$

Donde:

- Q: caudal real, en l/s
- D: diámetro del vertedero, en cm
- H: altura observada, en cm

### **3.5. Comparación de caudales observados y teóricos experimentales a partir de la ecuación Staus – Von Sanden**

Con la ecuación experimental general hallada a partir de la ecuación Staus – Von Sanden, se generaron caudales para compararlos con los observados en laboratorio, los cuales se muestran a continuación.

#### **3.5.1. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm**

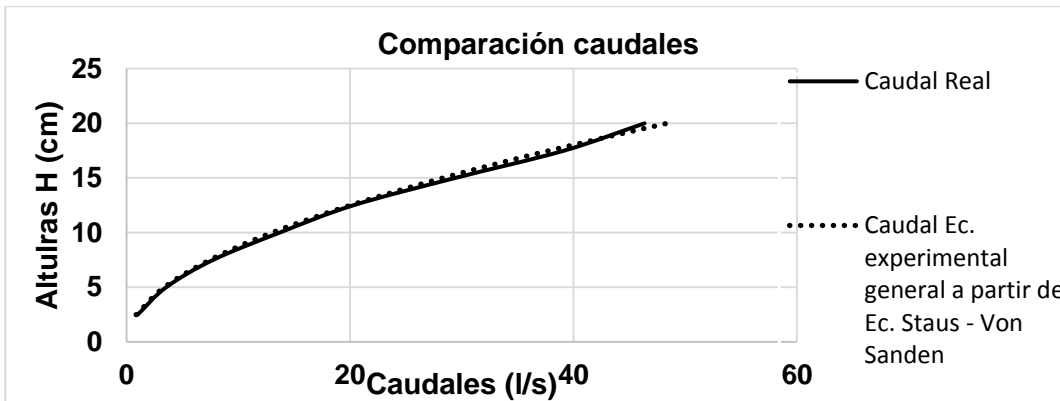
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LVIII. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Staus - Von Sanden	Error %
2,5	44	1,082	0,9110	16 %
5	44	3,947	3,5683	10 %
7,5	44	8,285	7,9030	5 %
10	44	14,177	13,8455	2 %
12,5	44	21,655	21,3163	2 %
15	44	30,541	30,2240	1 %
17,5	44	42,563	40,4652	5 %
20	44	49,940	51,9243	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.2. **Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm**

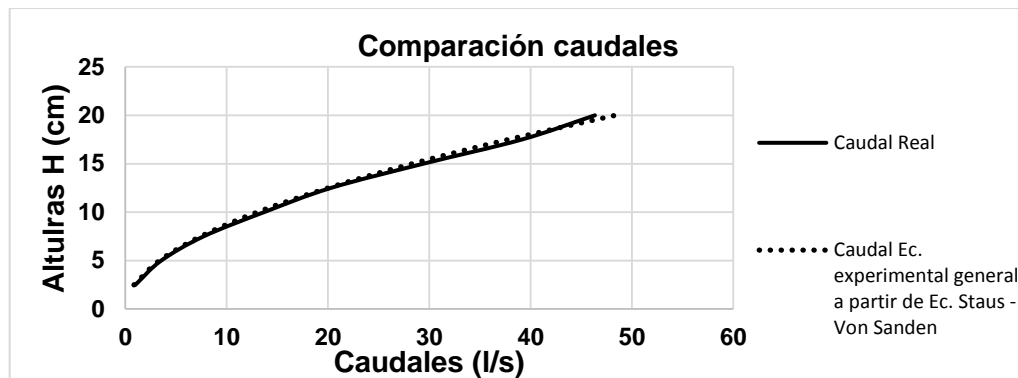
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LIX. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss – Von Sanden	Error %
2,5	44	1,082	0,9110	16 %
5	44	3,947	3,5683	10 %
7,5	44	8,285	7,9030	5 %
10	44	14,177	13,8455	2 %
12,5	44	21,655	21,3163	2 %
15	44	30,541	30,2240	1 %
17,5	44	42,563	40,4652	5 %
20	44	49,940	51,9243	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.3. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 40 cm

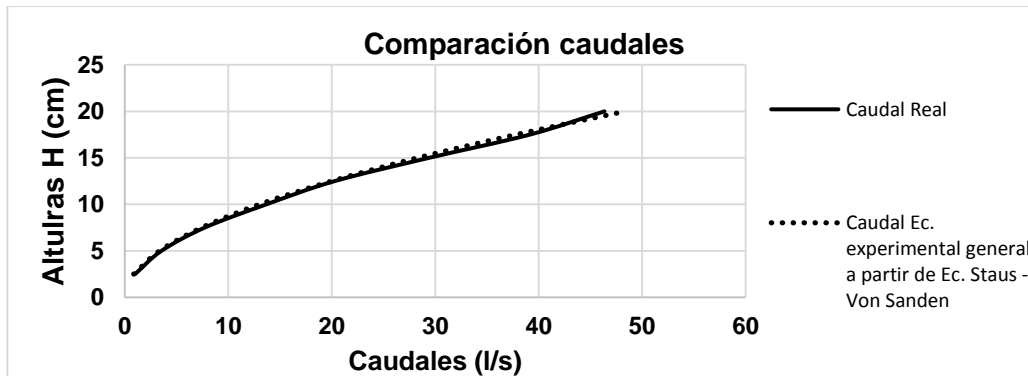
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LX. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss – Von Sanden	Error %
2,5	40	0,992	0,8593	13 %
5	40	3,540	3,3631	5 %
7,5	40	7,727	7,4406	4 %
10	40	13,690	13,0170	5 %
12,5	40	20,285	20,0052	1 %
15	40	29,403	28,3046	4 %
17,5	40	39,142	37,8006	3 %
20	40	46,356	48,3650	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.4. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 35 cm

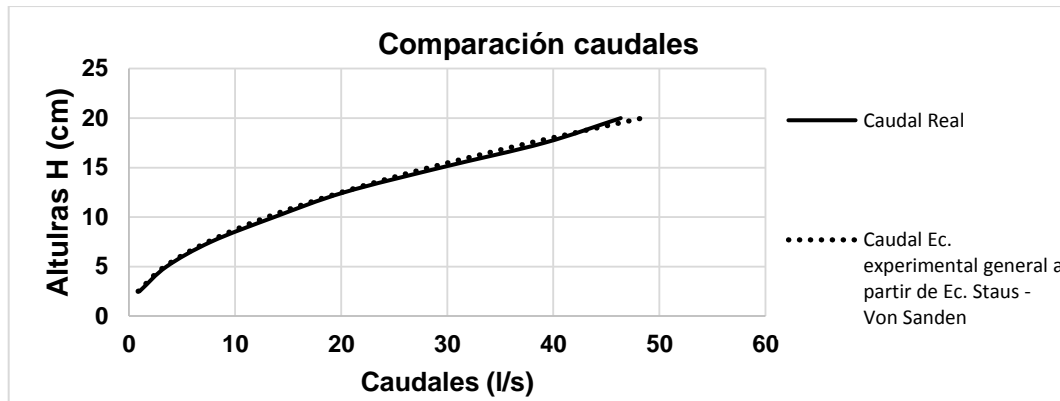
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXI. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss – Von Sanden	Error %
2,5	35	0,937	0,7916	16 %
5	35	3,707	3,0944	17 %
7,5	35	7,408	6,8334	8 %
10	35	12,214	11,9252	2 %
12,5	35	18,102	18,2706	1 %
15	35	26,128	25,7538	1 %
17,5	35	33,971	34,2424	1 %
20	35	42,985	43,5873	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 79. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.5. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 30 cm

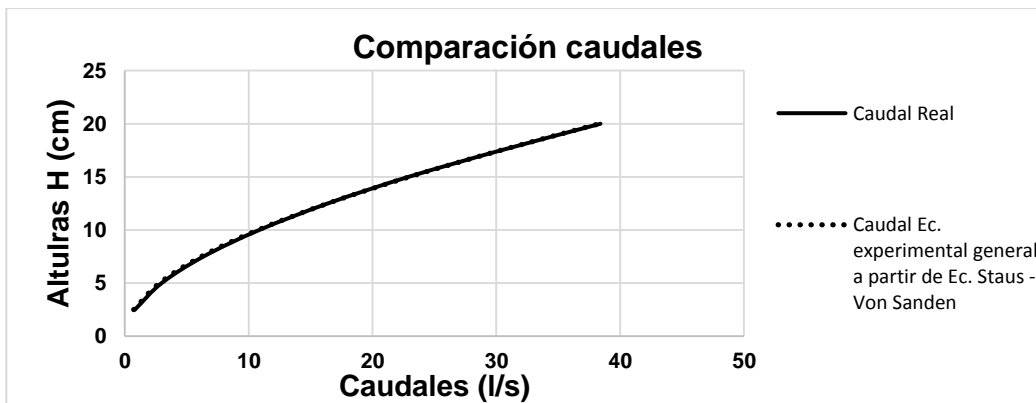
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXII. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss – Von Sanden	Error %
2,5	30	0,821	0,7199	12 %
5	30	2,980	2,8091	6 %
7,5	30	6,364	6,1861	3 %
10	30	10,865	10,7552	1 %
12,5	30	16,408	16,4003	0 %
15	30	22,916	22,9847	0 %
17,5	30	30,386	30,3511	0 %
20	30	38,413	38,3221	0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 80. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.6. **Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 25 cm**

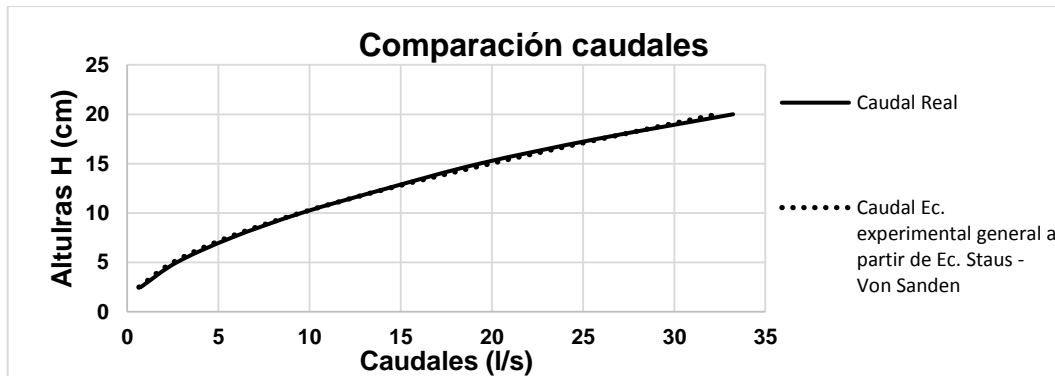
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXIII. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss – Von Sanden	Error %
2,5	30	0,740	0,6433	13 %
5	30	2,709	2,5027	8 %
7,5	30	5,718	5,4866	4 %
10	30	9,542	9,4806	1 %
12,5	30	14,254	14,3442	1 %
15	30	19,319	19,9099	3 %
17,5	30	25,754	25,9842	1 %
20	30	33,230	32,3484	3 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 81. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.7. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 20 cm

Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

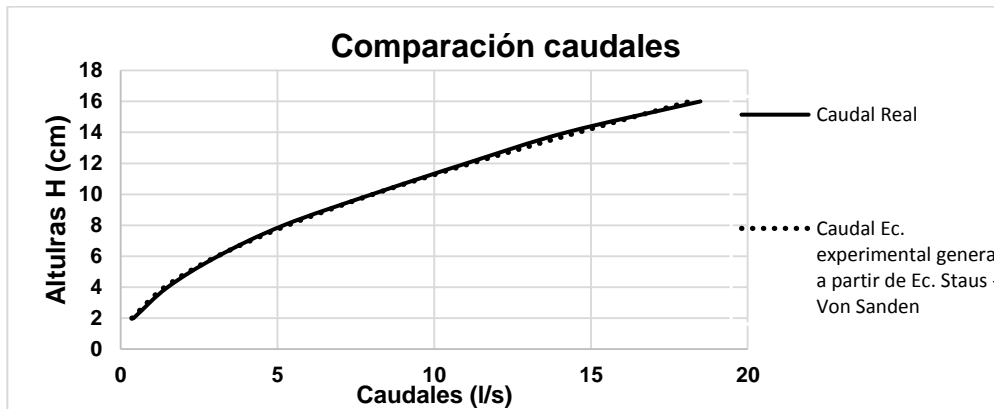


Tabla LXIV. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Stauss - Von Sanden	Error %
2	30	0,740	0,6433	13 %
4	30	2,709	2,5027	8 %
6	30	5,718	5,4866	4 %
8	30	9,542	9,4806	1 %
10	30	14,254	14,3442	1 %
12	30	19,319	19,9099	3 %
14	30	25,754	25,9842	1 %
16	30	33,230	32,3484	3 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6. **Comparación de caudales observados y teóricos experimentales a partir de la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta**

Con la ecuación experimental general hallada a partir de la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta en el *Manual de hidráulica*, se generaron

caudales para compararlos con los observados en laboratorio, los cuales se muestran a continuación.

### 3.6.1. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 44 cm

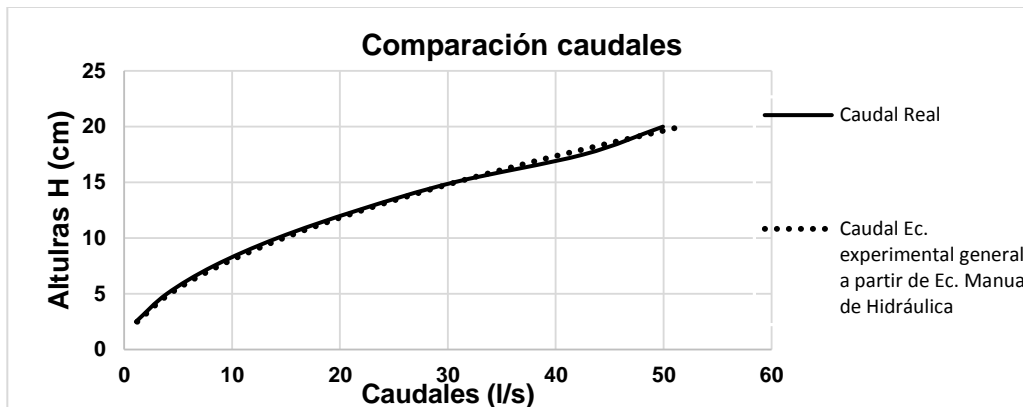
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXV. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	44	1,082	1,2052	11 %
5	44	3,947	4,2171	7 %
7,5	44	8,285	8,7742	6 %
10	44	14,177	14,7561	4 %
12,5	44	21,655	22,0845	2 %
15	44	30,541	30,7020	1 %
17,5	44	42,563	40,5639	5 %
20	44	49,940	51,6335	3 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 83. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 40 cm

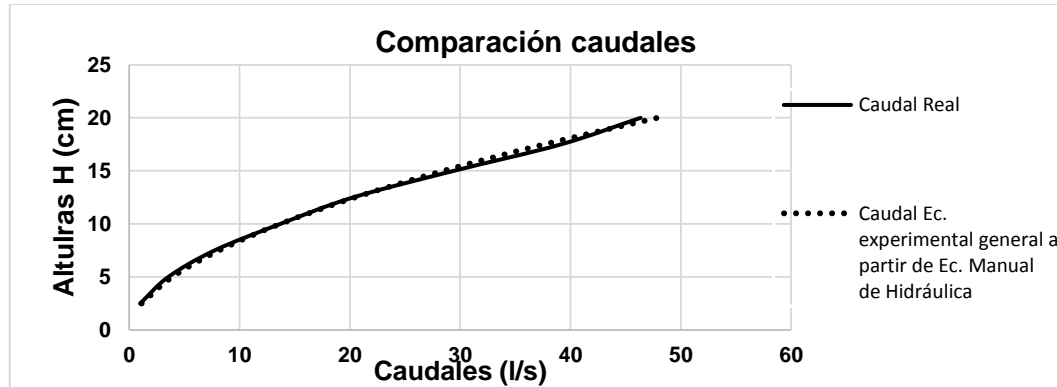
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXVI. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	40	0,992	1,1176	13 %
5	40	3,540	3,9107	10 %
7,5	40	7,727	8,1367	5 %
10	40	13,690	13,6840	0 %
12,5	40	20,285	20,4799	1 %
15	40	29,403	28,4714	3 %
17,5	40	39,142	37,6168	4 %
20	40	46,356	47,8821	3 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.3. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 35 cm

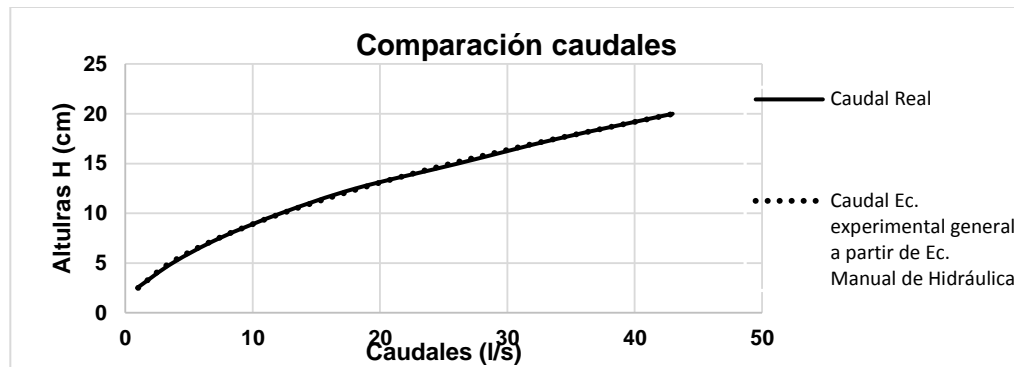
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXVII. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}} \text{ (l/s)}$ con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	35	0,937	1,0055	7 %
5	35	3,707	3,5185	5 %
7,5	35	7,408	7,3207	1 %
10	35	12,214	12,3117	1 %
12,5	35	18,102	18,4261	2 %
15	35	26,128	25,6162	2 %
17,5	35	33,971	33,8444	0 %
20	35	42,985	43,0803	0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 85. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.4. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 30 cm

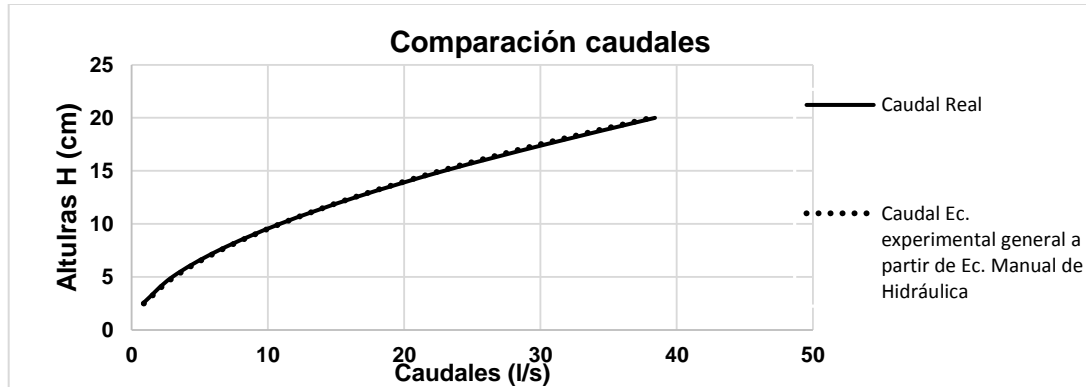
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXVIII. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	30	0,821	0,8900	8 %
5	30	2,980	3,1144	5 %
7,5	30	6,364	6,4799	2 %
10	30	10,865	10,8977	0 %
12,5	30	16,408	16,3099	1 %
15	30	22,916	22,6742	1 %
17,5	30	30,386	29,9575	1 %
20	30	38,413	38,1326	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 88. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.5. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 25 cm

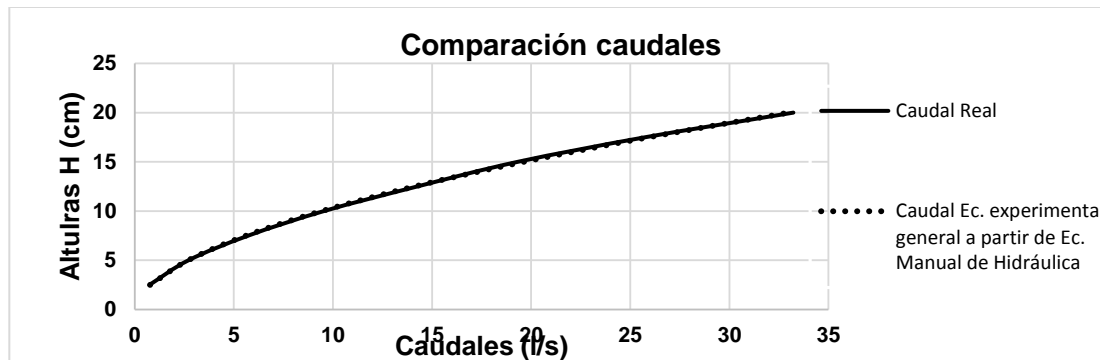
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXIX. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	25	0,740	0,7705	4 %
5	25	2,709	2,6959	0 %
7,5	25	5,718	5,6093	2 %
10	25	9,542	9,4335	1 %
12,5	25	14,254	14,1185	1 %
15	25	19,319	19,6277	2 %
17,5	25	25,754	25,9323	1 %
20	25	33,230	33,0090	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 86. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.6. Caudal observado y caudal ecuación experimental general para vertedero diámetro 20 cm

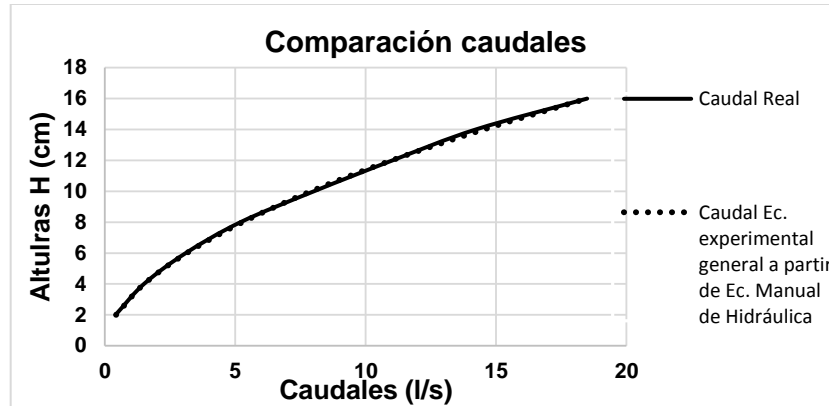
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXX. **Caudal real y generado con ecuación experimental general**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}} \text{ V/t}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con Ec. experimental a partir de Ec. Manual de hidráulica	Error %
2,5	25	0,412	0,4315	5 %
5	25	1,500	1,5097	1 %
7,5	25	3,103	3,1412	1 %
10	25	5,202	5,2828	2 %
12,5	25	8,018	7,9064	1 %
15	25	11,029	10,9915	0 %
17,5	25	14,220	14,5221	2 %
20	25	18,491	18,4851	0 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 87. **Comparación caudal real contra caudal generado con ecuación experimental general**



Fuente: elaboración propia.

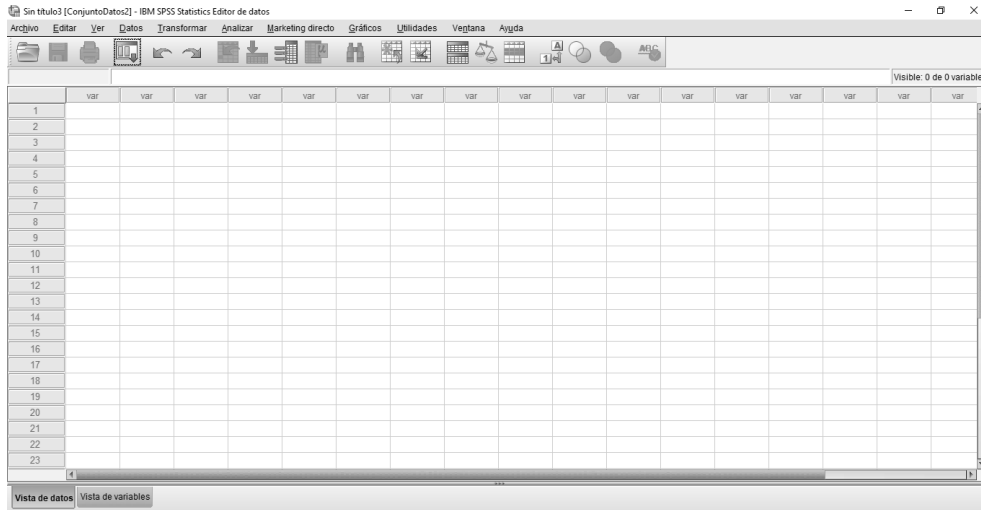
### 3.7. Obtención de modelo matemático con SPSS

Con el objetivo de obtener un nuevo modelo matemático para determinar la descarga en vertederos circulares, se emplea el programa SPSS, versión 23; partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos de vertederos circulares en el laboratorio.

El software estadístico SPSS es uno de los más conocidos por su capacidad para procesar grandes bases de datos y una interfaz sencilla para el análisis. Con este programa se puede relacionar los distintos diámetros de los vertederos circulares, la altura de carga y el caudal observado en los ensayos de laboratorio, para luego generar un modelo matemático que puede utilizarse para cualquier vertedero circular independientemente del diámetro.



Figura 88. **SPSS, programa estadístico informático, 1**

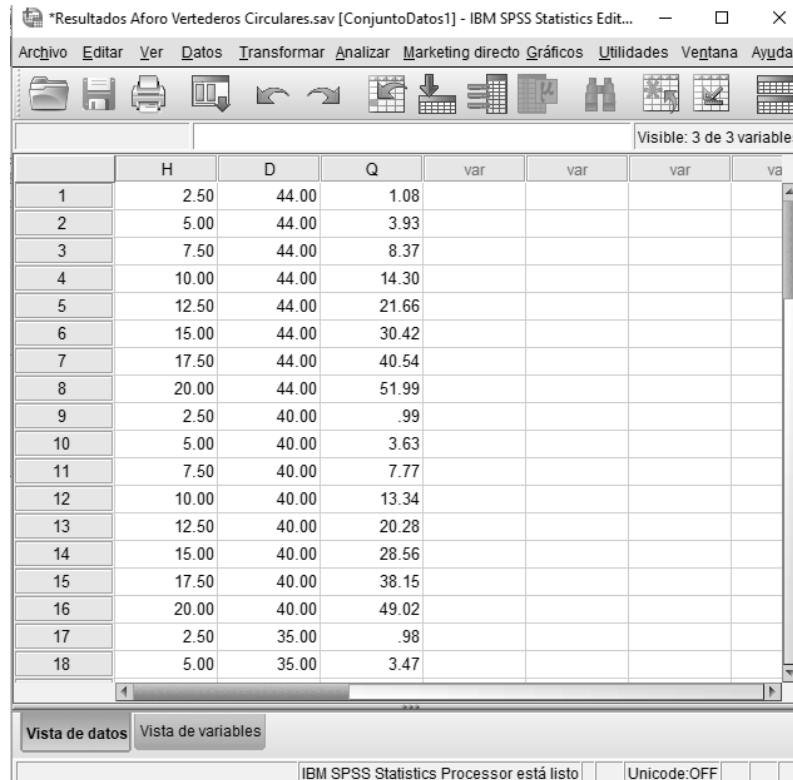


Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23.

### 3.7.1. Definición de la ecuación con SPSS Statistics 23

Para definir la ecuación es necesario ingresar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio.

Figura 89. **SPSS, programa estadístico informático, 2**



The screenshot shows the IBM SPSS Statistics interface. The main window displays a data view with 18 rows and 7 columns. The columns are labeled H, D, Q, and three unlabeled 'var' columns. The data values are as follows:

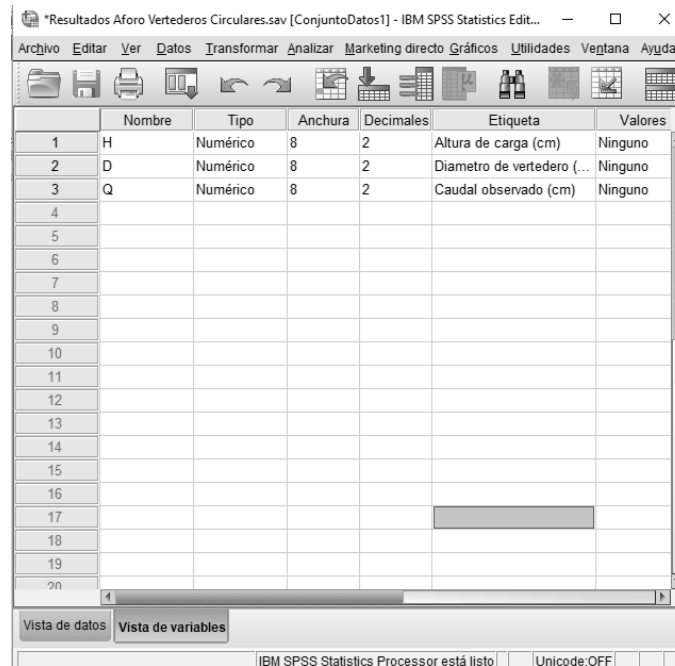
	H	D	Q	var	var	var	va
1	2.50	44.00	1.08				
2	5.00	44.00	3.93				
3	7.50	44.00	8.37				
4	10.00	44.00	14.30				
5	12.50	44.00	21.66				
6	15.00	44.00	30.42				
7	17.50	44.00	40.54				
8	20.00	44.00	51.99				
9	2.50	40.00	.99				
10	5.00	40.00	3.63				
11	7.50	40.00	7.77				
12	10.00	40.00	13.34				
13	12.50	40.00	20.28				
14	15.00	40.00	28.56				
15	17.50	40.00	38.15				
16	20.00	40.00	49.02				
17	2.50	35.00	.98				
18	5.00	35.00	3.47				

The interface also shows a menu bar with options like Archivo, Editar, Ver, Datos, Transformar, Analizar, Marketing directo, Gráficos, Utilidades, Ventana, and Ayuda. The status bar at the bottom indicates 'IBM SPSS Statistics Processor está listo' and 'Unicode:OFF'.

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23.

Desde la pestaña vista de variables, se le da formato y se etiquetan las variables.

Figura 90. **SPSS, programa estadístico informático, 3**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23.

Luego de ingresar los datos al programa, se define la ecuación la cual tomará la siguiente forma:

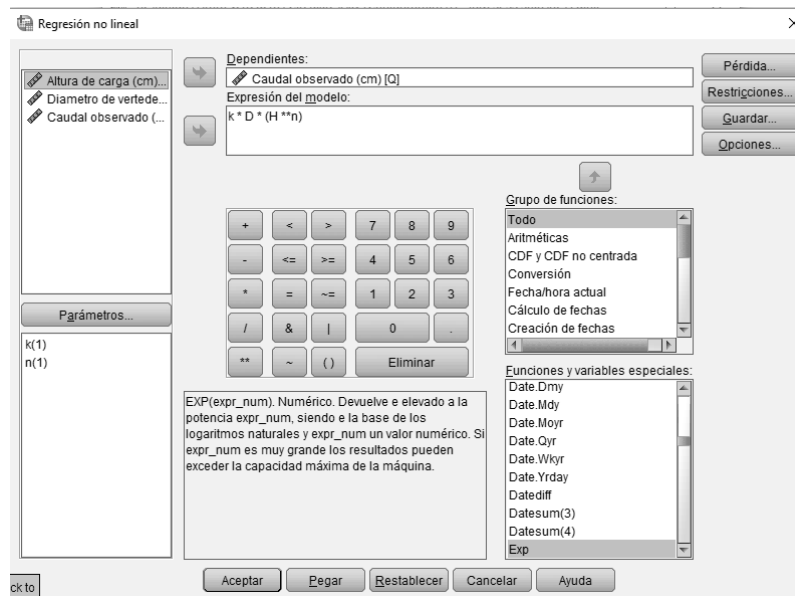
$$Q = k * D * H^n$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm
- k, n: valores a determinar con SPSS

En la barra de menús se elige la opción analizar, luego regresión y, por último, regresión no lineal, se abrirá una ventana, desde donde se definir la ecuación como se muestra a continuación.

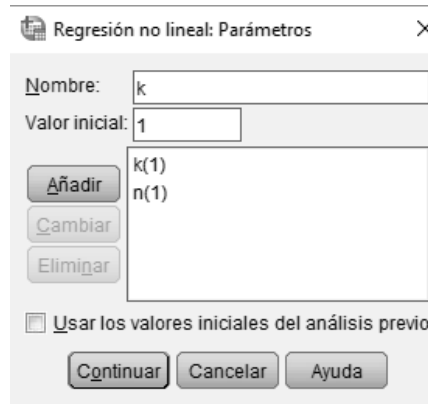
Figura 91. Definición de la ecuación en SPSS



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23.

En el recuadro 'Parámetros', se fijan los valores de k y n, asignándoles un valor de 1.

Figura 92. **Parámetros en SPSS**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23.

Finalmente, se da clic en aceptar para que el programa determine los parámetros solicitados

Figura 93. **Estimación de parámetros en SPSS**

Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
k	.005	.000	.004	.006
n	1.833	.032	1.770	1.897

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 23

Del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para  $k = 0,005$  y  $n = 1,833$ , por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado.

$$Q = 0,005 * D * H^{1,833}$$

Donde:

- Q: caudal en l/s
- D: diámetro del vertedero en cm
- H: carga del vertedero, en cm

### 3.7.2. Comparación de caudales observados y caudales teóricos generados con SPSS

A continuación, se presentan los caudales obtenidos con el modelo matemático hallado con el programa SPSS para los diferentes vertederos ensayados, y la respectiva comparación con el caudal observado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica

#### 3.7.2.1. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 44 cm

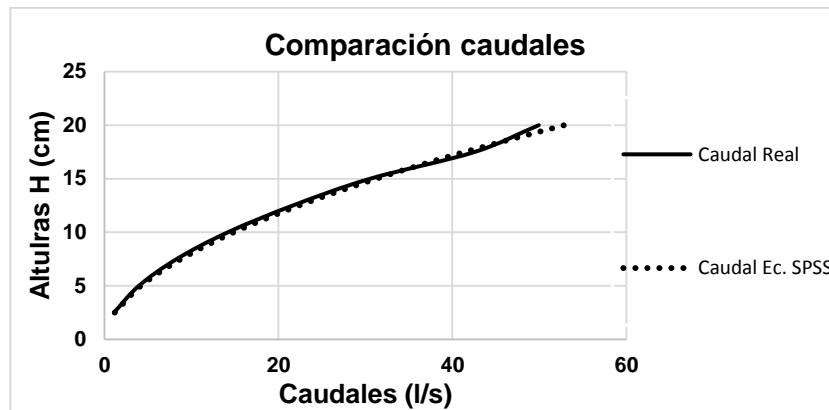
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXXI. Caudal real y caudal generado con SPSS

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,5	44	1,082	1,1767	9 %
5	44	3,947	4,1835	6 %
7,5	44	8,285	8,7859	6 %
10	44	14,177	14,8738	5 %
12,5	44	21,655	22,3753	3 %
15	44	30,541	31,2370	2 %
17,5	44	42,563	41,4174	3 %
20	44	49,940	52,8820	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 94. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.2. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 40 cm

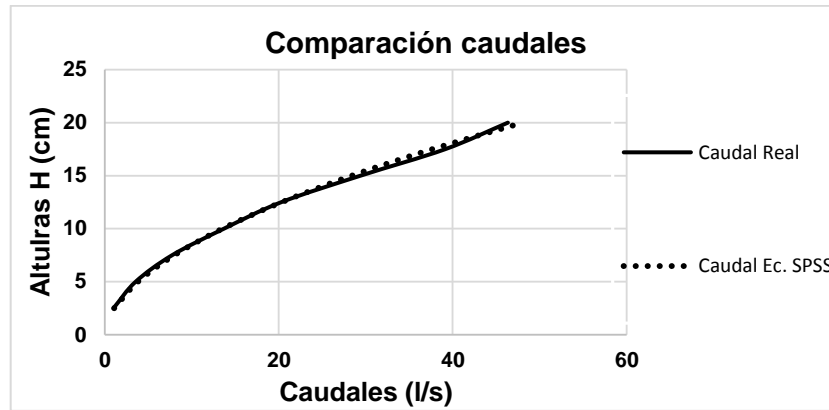
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXXII. **Caudal real y caudal generado con SPSS**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,5	40	0,992	1,0697	8 %
5	40	3,540	3,8032	7 %
7,5	40	7,727	7,9872	3 %
10	40	13,690	13,5217	1 %
12,5	40	20,285	20,3411	0 %
15	40	29,403	28,3973	3 %
17,5	40	39,142	37,6521	4 %
20	40	46,356	48,0745	4 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 95. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.3. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 35 cm

Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

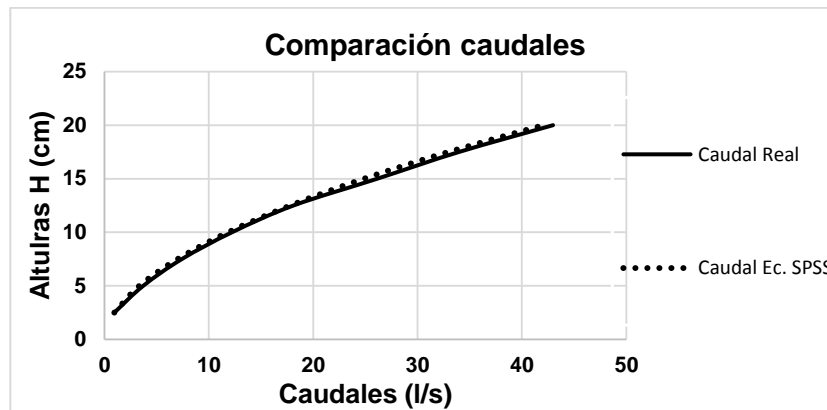
Tabla LXXIII. **Caudal real y caudal generado con SPSS**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado V/t}}$ (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,5	35	0,937	0,9360	0 %
5	35	3,707	3,3278	10 %
7,5	35	7,408	6,9888	6 %
10	35	12,214	11,8315	3 %
12,5	35	18,102	17,7985	2 %
15	35	26,128	24,8476	5 %
17,5	35	33,971	32,9456	3 %
20	35	42,985	42,0652	2 %

Fuente: elaboración propia.



Figura 96. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.4. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 30 cm

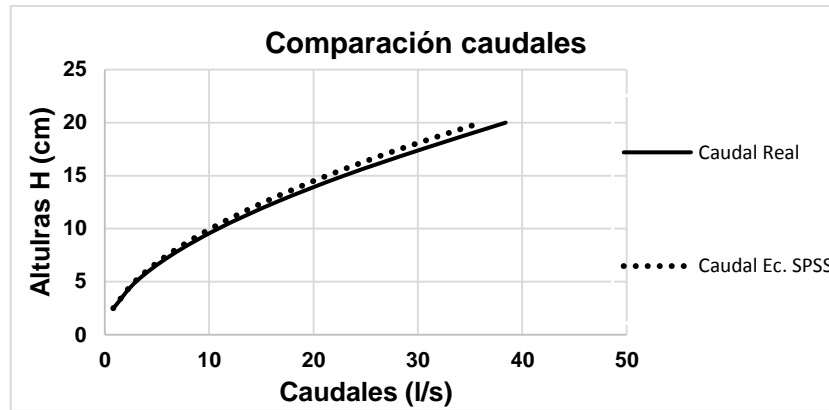
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXXIV. **Caudal real y caudal generado con SPSS**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,5	30	0,821	0,8023	2 %
5	30	2,980	2,8524	4 %
7,5	30	6,364	5,9904	6 %
10	30	10,865	10,1412	7 %
12,5	30	16,408	15,2559	7 %
15	30	22,916	21,2980	7 %
17,5	30	30,386	28,2391	7 %
20	30	38,413	36,0559	6 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 97. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.5. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 25 cm

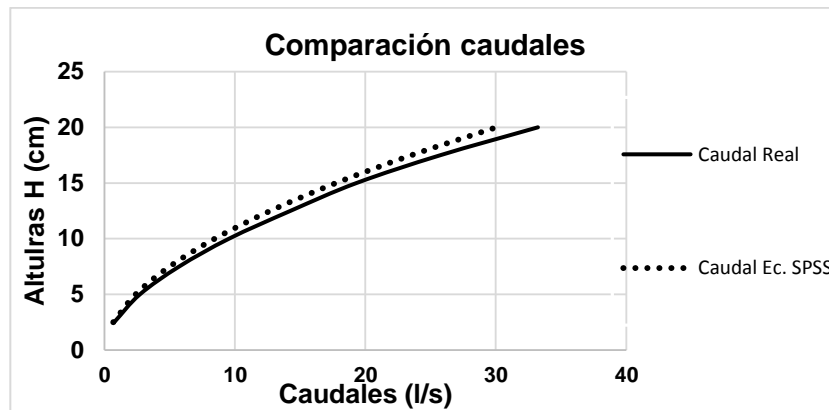
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXXV. **Caudal real y caudal generado con SPSS**

H (cm)	Diámetro (cm)	Q <sub>observado</sub> V/t (l/s)	Q <sub>generado</sub> (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,5	25	0,740	0,6686	10 %
5	25	2,709	2,3770	12 %
7,5	25	5,718	4,9920	13 %
10	25	9,542	8,4510	11 %
12,5	25	14,254	12,7132	11 %
15	25	19,319	17,7483	8 %
17,5	25	25,754	23,5326	9 %
20	25	33,230	30,0466	10 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 98. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2.6. Caudal observado y caudal generado con SPSS para vertedero diámetro 20 cm

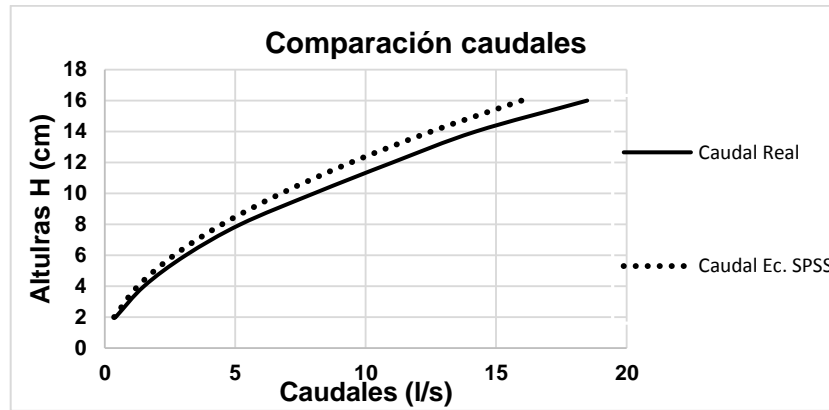
Se muestran los resultados de los caudales obtenidos en el laboratorio y los caudales obtenidos con la ecuación experimental general, así como la gráfica comparando los caudales mencionados anteriormente.

Tabla LXXVI. **Caudal real y caudal generado con SPSS**

H (cm)	Diámetro (cm)	$Q_{\text{observado}}$ V/t (l/s)	$Q_{\text{generado}}$ (l/s) con ecuación a partir de SPSS	Error %
2,0	20	0,412	0,3555	14 %
4,0	20	1,500	1,2641	16 %
6,0	20	3,103	2,6547	14 %
8,0	20	5,202	4,4942	14 %
10,0	20	8,018	6,7608	16 %
12,0	20	11,029	9,4385	14 %
14,0	20	14,220	12,5145	12 %
16,0	20	18,491	15,9786	14 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 99. **Comparación caudal real contra caudal generado con SPSS**



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. Se diseñaron y construyeron 6 vertederos circulares, con base en las especificaciones de diseño; una de ellas fue el borde circular afilado para asegurar la zona aireada bajo la zona vertiente. En la instalación de cada uno, se impermeabilizó la unión entre cada placa de vertedero y el canal para evitar filtraciones y de esa forma reducir los errores en la toma de datos.
2. Para calcular el caudal teórico que pasa a través de un vertedero circular se puede utilizar la ecuación propuesta por Stauss – Von Sanden y la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta en el *Manual de hidráulica*. Los caudales generados con la ecuación de Stauss - Von Sanden generan un promedio de error del 55 % respecto a los caudales observados y los resultados de la ecuación propuesta por Acosta y Azevedo generan un promedio de error del 12 %.
3. Al hallar los coeficientes de descarga, se observó que no son constantes para los diferentes diámetros de vertederos ensayados, tendiendo a disminuir a medida que disminuye el diámetro del vertedero; por lo cual se determinó un modelo matemático válido para cualquier diámetro a partir de las ecuaciones teóricas y los diferentes coeficientes de descarga denominado ecuación experimental general.
4. Se obtuvieron modelos matemáticos, para cada una de las ecuaciones teóricas que relacionan el coeficiente de descarga en función del diámetro en centímetros, para la ecuación de Stauss - Von Sanden  $C_d$ :

$0,41219D^{0,086}$  , con un coeficiente de correlación del 98 %; y para la ecuación propuesta por Azevedo y Acosta Cd:  $0,7587D^{0,984}$ , con un coeficiente de correlación del 97 %; los cuales reducen considerablemente el porcentaje de error entre el caudal teórico y el caudal real observado.

5. Con la ecuación experimental general a partir de la ecuación Stauss – Von Sanden se logró un promedio de error del 4 %; y con la ecuación experimental general a partir de la ecuación de Azevedo y Acosta el promedio de error logrado fue del 3 %.
6. Se obtuvo un modelo potencial para cada uno de los diámetros ensayados, el cual arrojó un porcentaje de error bajo, pero tiene la desventaja de ser específicamente para un diámetro dado; sin embargo, pueden ser utilizados para los vertederos cuyos diámetros sean iguales a los ensayados en el presente trabajo de graduación.
7. Con el programa estadístico SPSS, se obtuvo la siguiente ecuación  $Q=0,005*D*H^{1,833}$ ; la cual arrojó porcentaje de errores bajos para diámetros mayores a 40 cm.
8. Según los resultados obtenidos, se observó que la ecuación Stauss - Von Sanden va aumentando el promedio de error a medida que disminuye el diámetro del vertedero; para la ecuación de Azevedo y Acosta se observó que aumenta el promedio de error a medida que aumenta el diámetro del vertedero.

## RECOMENDACIONES

1. Para medir caudales utilizando vertederos circulares se deben seguir las especificaciones de diseño e instalación, corroborar las medidas, verificar que el bisel sea afilado para garantizar la zona aireada, considerar el material de fabricación, el cual debe poseer protección contra la corrosión.
2. Se debe asegurar que el flujo a través del canal donde se instalará el vertedero sea de régimen laminar, que elimina cualquier turbulencia que pueda presentarse; de ser necesario se debe colocar un pozo tranquilizador para realizar la toma de lectura de carga (H) sobre el vertedero.
3. Con la finalidad de obtener resultados confiables en la toma de lecturas de carga H, es necesario esperar a que el flujo de agua en el canal se estabilice.
4. La carga de altura (H) debe ser tomada a una distancia mayor o igual a cuatro veces la altura máxima (H), medida a partir de la ubicación del vertedero hacia aguas arriba.
5. Considerar que la altura de carga (H) mínima para aplicar las ecuaciones generadas, es aquella en donde exista una zona aireada bajo la vertiente y posea caída libre; en laboratorio esas condiciones fueron logradas con una altura mínima de 2,5 cm.



6. Es necesario efectuar un mantenimiento periódico al canal donde se encuentren instalados los vertederos, con la finalidad de remover sedimentos acumulados en el fondo y material adherido al contorno biselado del vertedero.
7. Si se emplea un vertedero circular con un diámetro de los ensayados en la presente investigación, utilizar la ecuación de calibración propia del vertedero, ya que presentó un menor porcentaje de error entre el caudal observado y el obtenido.
8. Si se emplea un vertedero circular con un diámetro diferente al de los ensayados en la presente investigación y comprendido en el rango de 20 a 44 cm, utilizar la ecuación general experimental a partir de la ecuación de Azevedo y Acosta, debido a que presentó un menor porcentaje de error entre el caudal observado y el obtenido, respecto a la ecuación general experimental a partir de la ecuación Stauss - Von Sanden.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR CHÁVEZ, Ariosto. *Vertederos*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2001. 23 p.
2. DE AZEVEDO, Netto y ACOSTA A., Guillermo. *Manual de hidráulica*. 6a ed. México: Harla, 1976. 578 p.
3. E CHOW, Ven. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill, 2004. 667 p.
4. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2010. 138 p.
5. MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2005. 266 p.
6. ORSON W., Israelsen y VAUGHN E., Hansen. *Principios y aplicaciones del riego*. 2a ed. México: Reverté, 1965. 121 p.
7. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general vol. 1*. México: Limusa, 1998. 254 p.

