



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

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON
DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE**

Santos Daniel Menchú Tumax
Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA
CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SANTOS DANIEL MENCHÚ TUMAX

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
SECRETARIA	Ing. 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 RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 14 de noviembre de 2014.

Santos Daniel Menchú Tumax

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 01 de Agosto de 2016

Ingeniero

Claudio Cesar Castañón Contreras

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Santos Daniel Menchú Tumax, quien se identifica con carné No. 2010-25395, titulado CALIBRACION DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

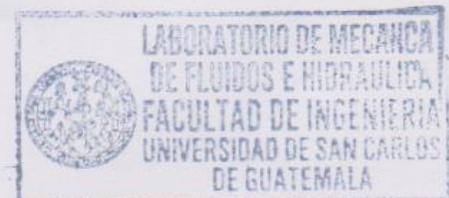
Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

Docente Departamento de Hidráulica





Guatemala,
05 de septiembre de 2016

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Santos Daniel Menchú Tumax, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



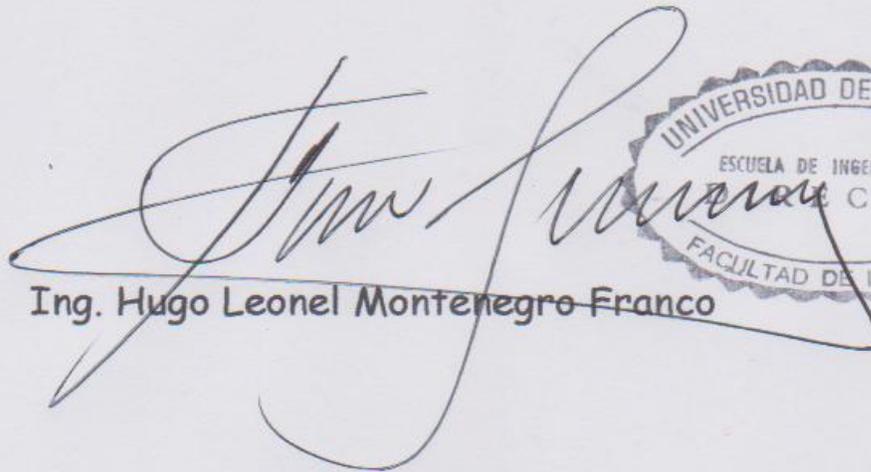
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



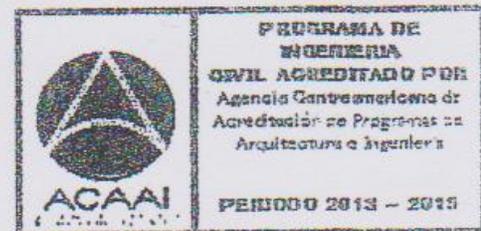


El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Santos Daniel Menchú Tuma~~x~~, titulado **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



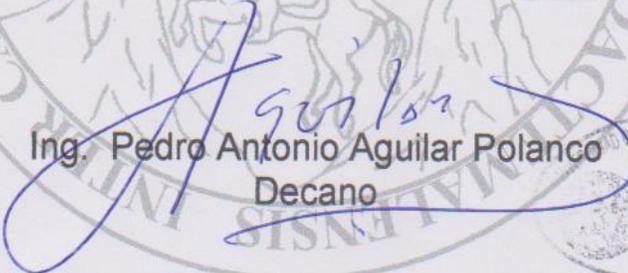
Guatemala, noviembre 2016
/mrrm.





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS RECTANGULARES DE PARED DELGADA CON DOS CONTRACCIONES Y DE ANCHO VARIABLE**, presentado por el estudiante universitario: **Santos Daniel Menchú Tumax**, y 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, noviembre de 2016

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Dueño de la inteligencia, sabiduría y conocimiento, el dador de todas mis fuerzas durante el trayecto y la razón principal de mi vida.

Mis padres

José Alejandro Menchú García y María Francisca Tumax Tzoc quienes son las bases de mi formación personal y académica.

Mis hermanos

Tránsito, Victoria, Juan, José, Verónica, Antonieta, Francisco, Esteban, Rosaura y Cesar Menchú Tumax, con quienes nos hemos apoyado siempre y lo seguiremos haciendo.

Mi sobrino

Fernando Marroquín Menchú, por su apoyo incondicional durante el trayecto de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi casa de estudios, y también al pueblo de Guatemala, que contribuyeron con mi desarrollo profesional, así como con muchos otros.

La facultad de Ingeniería

Por darme los conocimientos necesarios para mi formación académica.

**Mis amigos de la
facultad**

Kevin Montoya, Adrián Miranda, Maribel, Claudia, Flor Quic y entre otros con quienes nos apoyamos en los cursos y convivimos.

**Mi asesor Ingeniero Luis
Sandoval Mendoza**

Por apoyarme en mi trabajo de graduación y depositar su confianza en mi persona.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MEDICIÓN DE CAUDALES	1
1.1. Hidrometría.....	1
1.1.1. La importancia de la medición de caudal.....	1
1.2. Métodos de aforos en canales abiertos	1
1.2.1. Vertedero	2
1.2.2. Método volumétrico	4
1.2.3. Método químico	5
1.2.4. Método de velocidad superficial.....	6
1.2.4.1. Aforos con flotadores.....	7
1.2.4.2. Aforos con molinete	9
1.2.5. Canal parshall.....	13
2. VERTEDEROS.....	15
2.1. Definición de vertederos	15
2.2. Clasificación de vertederos.....	16
2.2.1. Forma geométrica.....	16
2.2.1.1. Simples.....	16
2.2.1.2. Compuestos.....	17
2.2.2. Ancho de pared	18
2.2.2.1. Pared ancha	18

	2.2.2.2.	Vertederos de pared delgada	19
	2.2.3.	Terminología de vertedero rectangular	20
	2.2.4.	Vertedero rectangular de pared delgada.....	21
	2.2.4.1.	Totalmente contraídos.....	21
	2.2.4.2.	Parcialmente contraído	22
	2.2.4.3.	Sin contracción.....	22
	2.2.5.	Limitaciones en vertedero rectangular	23
	2.2.6.	Instalación de vertederos rectangulares.....	24
2.3.		Ecuaciones para el cálculo de caudal para vertedero rectangular	27
3.		ENSAYO DE VERTEDEROS RECTANGULARES.....	33
3.1.		Descripción del equipo para los ensayos de vertederos rectangulares con dos contracciones	33
	3.1.1.	Diseño y dimensiones de los vertederos rectangulares con dos contracciones	34
3.2.		Ensayo y calibración de los vertederos rectangulares de distintos anchos de solera.....	44
	3.2.1.	Realización de los ensayos	44
	3.2.2.	Calibración de vertederos.....	47
	3.2.3.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 6,2 cm	47
	3.2.4.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 10 cm	55
	3.2.5.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 15,2 cm	61
	3.2.6.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 20 cm	67
	3.2.7.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 35 cm	73

3.2.8.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 40 cm.....	79
3.2.9.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 45 cm.....	85
3.2.10.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 50 cm.....	91
3.2.11.	Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 55 cm.....	97
3.3.	Obtención del modelo matemático basado en la ecuación de Francis utilizando el programa SPSS y Cd en función de la base para vertederos rectangulares con dos contracciones y ancho variado	104
3.3.1.	Obtención del modelo matemático con SPSS	104
3.3.1.1.	Asignación de datos	105
3.3.1.2.	Ingreso de datos	105
3.3.2.	Obtención del modelo matemático con Cd en función de la base.....	109
3.4.	Calibraciones de V.R. con el modelo SPSS y Cd en función de la base	111
3.4.1.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 6,2 cm	111
3.4.2.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 10 cm	113
3.4.3.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 15,2 cm ...	115
3.4.4.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 20 cm	117
3.4.5.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 35 cm	119

3.4.6.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 40 cm.....	121
3.4.7.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 45 cm.....	123
3.4.8.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 50 cm.....	125
3.4.9.	Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 55 cm.....	127
CONCLUSIONES.....		129
RECOMENDACIONES		131
BIBLIOGRAFÍA.....		133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Vertedero rectangular en cauce artificial	2
2.	Vertedero rectangular en cauce natural	3
3.	Aforo volumétrico	4
4.	Aforo químico	6
5.	Aforo con flotador	9
6.	Molinete de helisis.....	10
7.	Molinete de tazón cónico	10
8.	Aforo con molinete	11
9.	Sección de aforo con molinete	12
10.	Canal Parshall.....	14
11.	Vertedero rectangular.....	15
12.	Vertederos rectangulares	17
13.	Vertederos triangulares.....	17
14.	Vertederos trapezoidales	18
15.	Vertedero de pared ancha.....	19
16.	Vertedero de pared delgada.....	19
17.	Terminología de vertedero	20
18.	Totalmente contraído	21
19.	Parcialmente contraído	22
20.	Sin contracción.....	22
21.	Sección de vertedero	24
22.	Instalación de vertederos	26
23.	Características de instalación	27

24.	Sección de vertedero rectangular	27
25.	Vertedero rectangular con dos contracciones.....	31
26.	Canal rectangular.....	33
27.	Dimension interna del canal rectangular	34
28.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 6,2 cm.....	35
29.	V.R. construido	35
30.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 10 cm.....	36
31.	V.R. construido	36
32.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 15,2 cm.....	37
33.	V.R. construido	37
34.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 20 cm.....	38
35.	V.R. construido	38
36.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 35 cm.....	39
37.	V.R. construido	39
38.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 40 cm.....	40
39.	V.R. construido	40
40.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 45 cm.....	41
41.	V.R. construido	41
42.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 50 cm.....	42
43.	V.R. construido	42
44.	Diseño de V.R. con ancho de solera de 55 cm.....	43
45.	V.R. construido	43
46.	V.R. instalado.....	44
47.	Zona aireada bajo la lámina vertiente	45
48.	Toma de lectura de la carga H.....	45
49.	Deposito utilizado para aforo volumétrico	46
50.	Toma de lectura de volumen de agua.....	46
51.	V.R. con ancho de solera de 6,2.....	47
52.	Curvas de descargas de V.R de solera de 6,2	50

53.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera 6,2.....	51
54.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera 6,2.....	53
55.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2	54
56.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 10.....	57
57.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 10.....	58
58.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 10.....	59
59.	Comparación de caudales de V.R. de solero de 10	60
60.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 15,2.....	63
61.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 15,2.....	64
62.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solare de 15,2.....	65
63.	Comparación de caudales.....	67
64.	Curvas de descargas de V.R de solera de 20.....	69
65.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 20	71
66.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 20	73
67.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 35.....	75
68.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 35.....	76
69.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera 35.....	77
70.	Comparación de caudales de V.R de solera de 35	79
71.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 40.....	81
72.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 40.....	82
73.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 40	83
74.	Comparación de caudales de V.R de solera de 40	85
75.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 45.....	87
76.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 45.....	88
77.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 45.....	89
78.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 45	91
79.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 50.....	93
80.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 50.....	94
81.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 50.....	95

82.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 50.....	97
83.	Curvas de descargas de V.R. de solera de 55	99
84.	Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 55	100
85.	Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 55.	101
86.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 55.....	103
87.	Formato de datos.....	105
88.	Ingreso de datos	106
89.	Asignación de parámetro	107
90.	Datos dependientes	107
91.	Definiendo ecuación	108
92.	Obtención del Cd en función de la base	110
93.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2.....	112
94.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 10.....	114
95.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 15,2.....	116
96.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 20.....	118
97.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 35.....	120
98.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 40.....	122
99.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 45.....	124
100.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 50.....	126
101.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 55.....	128

TABLAS

I.	Datos obtenidos en ensayos de V.R. de solera de 6,2	48
II.	Caudales observados de V.R. de solera de 6,2.....	49
III.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 6,2.....	50
IV.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2.....	54
V.	Datos obtenidos en ensayos de V.R. de solera de 10	55

VI.	Caudales observados de V.R. de solera de 10	56
VII.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 10	56
VIII.	Comparación de caudales de V.R de solera de 10	60
IX.	Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 15,2	61
X.	Caudales observados de V.R. de solera de 15,2	62
XI.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 15,2	62
XII.	Comparación de caudales de V.R. de salera de 15,2	66
XIII.	Datos obtenidos en ensayo de V.R. de solera de 20	67
XIV.	Caudales observados de V.R. de solera de 20	68
XV.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 20	69
XVI.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 20	72
XVII.	Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 35	73
XVIII.	Caudal observado de V.R. de solera de 35.....	74
XIX.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 35	75
XX.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 35	78
XXI.	Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 40	79
XXII.	Caudal observado de V.R. de solera de 40.....	80
XXIII.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 40	81
XXIV.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 40	84
XXV.	Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 45	85
XXVI.	Caudal observado de V.R. de solera de 45.....	86
XXVII.	Caudal teórico y real observado de V.R.....	87
XXVIII.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 45	90
XXIX.	Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 50	91
XXX.	Caudal observado de V.R. de solera de 50.....	92
XXXI.	Caudal teórico y real observados de V.R. de solera de 50	93
XXXII.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 50	96
XXXIII.	Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 55.....	97
XXXIV.	Caudal observado de V.R. de solera de 55.....	98

XXXV.	Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 55.....	99
XXXVI.	Comparación de caudales de V.R. de solera de 55.....	102
XXXVII.	Estimación de los parámetros.....	108
XXXVIII.	Datos de b y Cd de cada V.R.	109
XXXIX.	Comparación de caudales obtenidos con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 6,2.....	112
XL.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 10.....	113
XLI.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R de solera de 15,2.....	115
XLII.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 20.....	117
XLIII.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de solera de 35.....	119
XLIV.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de solera de 40.....	121
XLV.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 45.....	123
XLVI.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 50.....	125
XLVII.	Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 55.....	127

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de carga alcanzada por el agua
B	ancho de canal de acceso al vertedero
Q	Caudal
Cd	Coeficiente de descarga
b	ancho de solera del vertedero
dy	diferencia de área
μ	Mu
n	Número de contracciones del vertedero
s	Segundo
t	Tiempo
v	velocidad
V	Volumen

GLOSARIO

Aforo	Acción y efecto de medir caudales de una corriente de agua.
Acrónimo	Es una clase de sigla cuya pronunciación se realiza del mismo modo que de una palabra.
Canal	Es un conducto en el que el líquido fluye con una superficie sometida a la presión atmosférica.
Caudal	Volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por una sección normal determinada de una corriente líquida.
Contracción	Disminución del área que experimenta la masa fluida.
Corriente	Movimiento de traslación continua y permanente o accidental de las aguas de un canal, río o mar, en dirección determinada.
Fluido	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzo de corte.
Flujo	Movimiento de un fluido.
Napa	Lámina de líquido.

Vertedero

Dispositivo utilizado para regular y medir caudales en cauces de ríos y canales abiertos.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se basa en el estudio de flujo en vertederos rectangulares de pared delgada con dos contracciones, con base al comportamiento de la velocidad, efecto de la contracción, variación en su ancho de solera, determinación de coeficientes de descarga; que relaciona a cada uno de los vertederos. El informe se presentó de la siguiente forma:

Capítulo uno: conceptos básicos de la hidrometría y tipos de métodos de aforos existentes para mediciones de flujo.

Capítulo dos: definición de vertederos rectangulares con dos contracción, clasificación de vertederos por sus formas geométricas y deducción de la ecuación teórica para vertedero rectangular de pared delgada.

Capítulo tres: ensayo de vertederos rectangulares de pared delga con dos contracciones y calibración de vertederos. Consiste en realizar aforos para cada ancho de soleras con respecto a distintas alturas de cargas para obtener el caudal real observado.

Comparación del caudal real observado con respecto al caudal teórico obtenido con la ecuación de Francis. Determinar los coeficientes de descarga y obtener ecuaciones experimentales para cada vertedero.

Obtención del modelo matemático que permite relacionar los distintos anchos de soleras de vertederos, basado en la ecuación de Francis con el uso del programa SPSS y el coeficiente de descarga en función del ancho de solera.

OBJETIVOS

General

Elaborar y calibrar distintos vertederos rectangulares de pared delgada con dos contracciones en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.

Específicos

1. Construir distintos anchos de solera de vertederos rectangulares con dos contracciones.
2. Realizar los ensayos necesarios en el Laboratorio de Mecánica de Fluido e Hidráulica para obtener el caudal real observado de cada uno de los vertederos.
3. Calibrar y determinar el coeficiente de descarga que afecte a la ecuación de Francis para obtener la ecuación de calibración de cada vertedero.
4. Obtener la ecuación experimental y comparar los caudales obtenidos con la ecuación de calibración y la ecuación experimental con respecto al caudal real observado para cada vertedero.
5. Elaborar una fuente de consulta sobre estos vertederos, utilizados para medir caudal de gran magnitud y así fortalecer el área de investigación en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería hidráulica cuenta con dispositivos para medir caudales en cauces naturales y artificiales. Los dispositivos más utilizados son los vertederos por su facilidad de construcción e instalación.

El caudal en un vertedero se obtiene por medio del aforo volumétrico y por la ecuación de Francis para vertederos rectangulares con dos contracciones.

Dada la importancia de la medición del caudal, es necesario utilizar métodos precisos para realizar aforos. Los vertederos rectangulares de pared delgada son los más utilizados por tener la mejor precisión en mediciones de caudales en canales principales y en ríos.

1. MEDICIÓN DE CAUDALES

1.1. Hidrometría

Se define la hidrometría como la parte de la Hidrología e Hidráulica que se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que pasan por una unidad de tiempo dentro de una sección transversal de un flujo.

1.1.1. La importancia de la medición de caudal

La medición de caudal es utilizada para proveer datos oportunos que, una vez procesados, proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en el análisis, ejecución y evaluación del manejo de agua para la necesidad humana; y así brindar un mejor control sobre su uso y distribución. Dicha medición se realiza a través medidores de flujo, dispositivos que utilizan diferentes principios mecánicos o físicos para permitir que un flujo de agua pueda ser cuantificada.

1.2. Métodos de aforos en canales abiertos

Los métodos más utilizados en aforo, en canales abiertos, son:

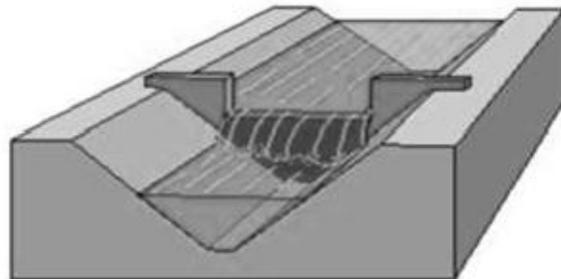
- 1) Vertedero
- 2) Método volumétrico
- 3) Método químico
- 4) Método velocidad superficial
- 5) Canal parshall

1.2.1. Vertedero

Este método es el más factible en costo e instalación y es utilizado para medir caudales de agua en canales abiertos; puesto que son fáciles de fabricar e instalar ya que para calcular el caudal simplemente es necesario determinar la carga H de agua sobre la cresta del vertedero y utilizar la ecuación correspondiente según la sección del vertedero.

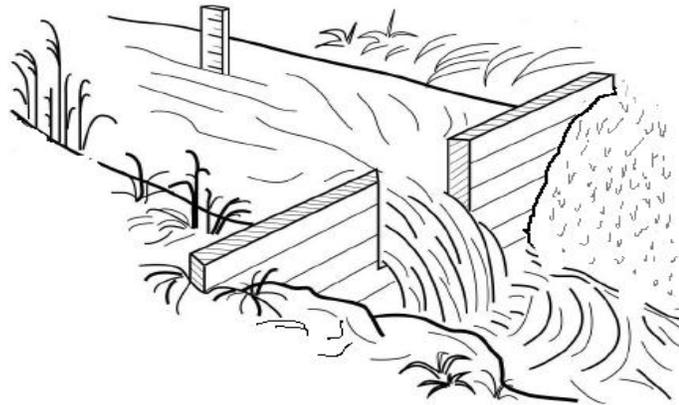
La altura H se debe medir a una distancia de aguas arriba tal que no sea afectada por la presión de la superficie del agua que se produce cerca de la cresta.

Figura 1. **Vertedero rectangular en cauce artificial**



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Apuntes sobre vertederos*. p. 6.

Figura 2. **Vertedero rectangular en cauce natural**



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Apuntes sobre vertederos*. p. 6.

Los vertederos tienen las siguientes ventajas en la medición del caudal de agua:

- Se logra precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es factible
- No son obstruidos por los materiales que flotan en el agua
- la vida útil del dispositivo es relativamente larga

1.2.2. Método volumétrico

Por lo general, este método se emplea para caudales de menor magnitud de agua para tener mejor precisión en los aforos; para realizar este método, se requiere de un recipiente de un volumen conocido para coleccionar el agua como se ilustra en la figura 3. Para obtener el caudal, se debe dividir el volumen de agua recolectado en el recipiente entre el tiempo transcurrido en coleccionar dicho volumen de agua, como se presenta en la siguiente ecuación.

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

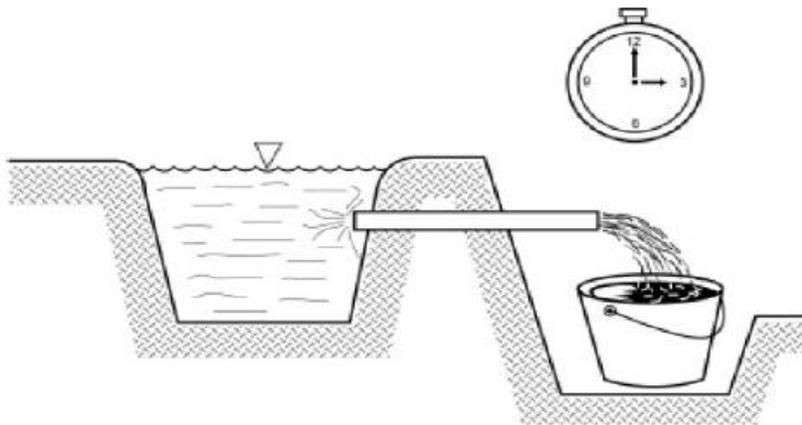
Donde

Q = Caudal (l/s)

V = Volumen (l)

t = Tiempo (s)

Figura 3. Aforo volumétrico



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Apuntes sobre vertederos*. p. 6.

1.2.3. Método químico

Este método consiste en hallar el caudal con el uso de una proporción conocida de sustancia química en la corriente del agua. La sustancia comúnmente utilizada es la sal común por conveniencia. Antes de introducir en la corriente se debe disolver la sal en agua y se debe situar una sección suficientemente lejos, aguas abajo, para que se mezcle perfectamente, así se podrá determinar la cantidad de concentración de dicha sustancia que contiene el agua. Los pasos a seguir en este método son los siguientes:

- 1) Realizar una toma de muestra de agua de la corriente a aforar, y determinar mediante el análisis de laboratorio la concentración (c_2) de la sustancia química que se utilizará para el aforo.
- 2) Preparar una solución de concentración (c_1) conocida.
- 3) Determinar un punto turbulento del río, inyectar el caudal (q) de la solución.
- 4) Aguas abajo del punto de inyección, después de que se haya producido una buena mezcla, tomar una muestra de agua y mediante análisis de laboratorio determinar la concentración de (c) resultante.

Se presenta la siguiente ecuación.

$$C \times q = (Q + q) \times c_2 \rightarrow Q = q \times (C/c_2)$$

Donde

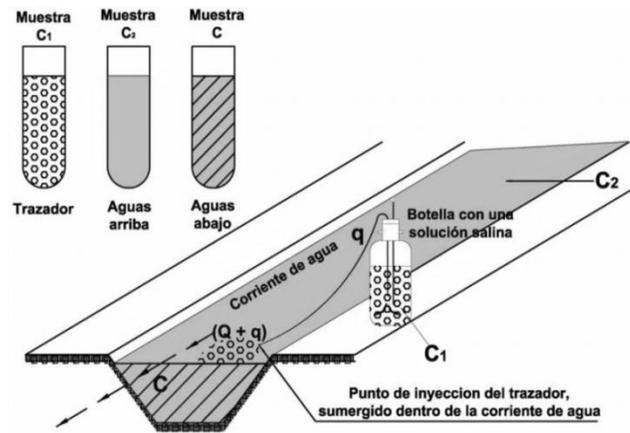
C= muestra

q = (caudal de inyección)

c_2 = toma de muestras

Q= caudal de río

Figura 4. Aforo químico



Fuente: *Cueva del ingeniero civil. Aforo químico.* www.cuevadelcivil.com/2011/02/metodos-de-afora-directo.html. Consulta: 4 de abril de 2015.

1.2.4. Método de velocidad superficial

Este método es usado en corriente de grandes magnitudes por lo que no requiere de construcciones de estructura para su uso. Los métodos más conocidos para velocidad media son:

- Flotadores
- Molinete

1.2.4.1. Aforos con flotadores

Es útil este método de medición de velocidad mediante flotadores durante eventos de crecidas en ríos, cuando el uso de molinete no es viable, debido a la carga de materia de sedimento y mayor turbulencia en los cauces.

La medición de la velocidad de flujo con flotador incluye los pasos siguientes:

- Establecer un tramo de medición el cual debe ser recto y de unos cien metros de longitud. El tramo de medición se demarca claramente en los márgenes del río con marcas visibles.
- El ancho de la sección superior, la cual debe ser perpendicular a la dirección del flujo, se subdivide en tantas distancias como sea posible. En ríos anchos puede ser 10, 15 y 25 metros. Esto para disminuir el error, ya que la fuente mayor de este es la variación de la velocidad a lo largo de la sección transversal.
- En cada punto de medición se coloca un flotador con un cuerpo de resistencia colocado a una profundidad de $0,6H$.
- El flotador se lanza al río a una distancia de unos 10 metros aguas arriba del extremo superior del tramo de medición, para que el flotador se ajuste a la velocidad del flujo.

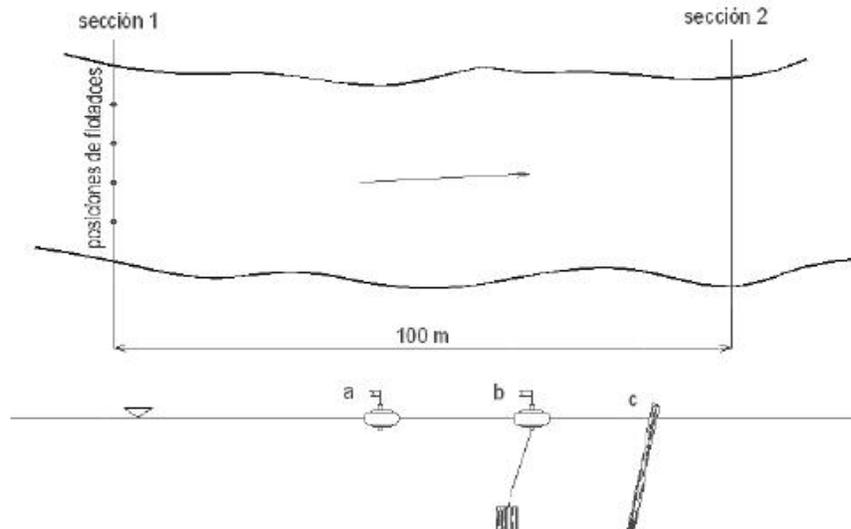
- Se registra el tiempo, con cronómetro, que el flotador hace para transcurrir en el tramo de medición (entre sección 1 y sección 2). Si se dispone del auxilio de una lancha, la medición de la velocidad en cada sección longitudinal se hace con un solo flotador y por un solo observador cuando flotador se puede recuperar. Cuando no se logra recuperar necesitan varios flotadores simultáneamente, por lo que se necesitan varios observadores.

La velocidad media de la sección transversal se obtiene del promedio de todas las mediciones, las cuales se multiplican por un factor de corrección w_0 . Este factor considera la relación entre la profundidad del flotador y la profundidad total del agua. Cuando se usan flotadores superficiales, w_0 varía entre 0,75 a 0,85 para corrientes poco profundas y secciones regulares con velocidades del flujo superiores a 2 metros por segundo. Cuando se usan flotadores con cuerpos de resistencia colocados a 0,6h, w_0 es 1,0.

El caudal total se determina con la suma de los caudales de la sección de influencia de cada sección longitudinal de medida.

Así que respectivamente la sección hidráulica superior e inferior del tramo de medición. Del río y los tipos de flotadores más utilizado son: a) flotador superficial, b) flotador con cuerpo de resistencia y c) flotador tipo varilla, como se ilustra en la figura 5.

Figura 5. Aforo con flotador

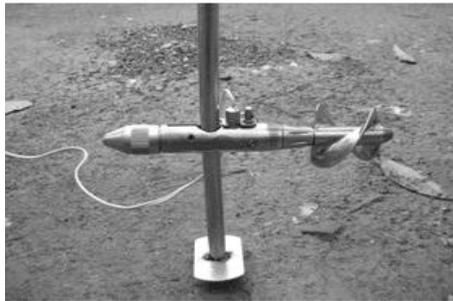


Fuente: OROZCO, *Elfego. Apuntes de hidrología*. p. 50.

1.2.4.2. Aforos con molinete

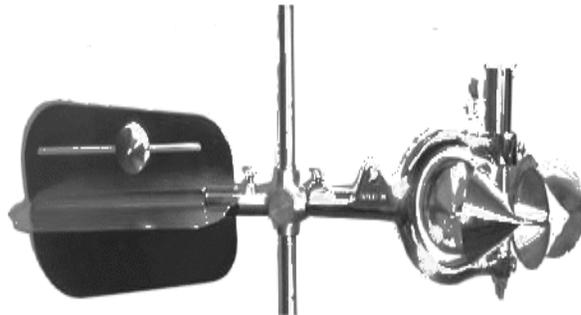
Este método es usado para determinar la velocidad del flujo en cauces naturales. El principio de medición se basa en el registro del número de revoluciones por segundo producido por la hélice del molinete; las figuras 6 y 7 ilustran los dos principales tipos de molinetes; en la figura 8 se ilustra el aforo con molinete.

Figura 6. **Molinete de helisis**



Fuente: *Aforo en un cauce natural. Método del molinete.*
www.galeon.com/elregante2/aforo.html. Consulta: 20 de abril de 2015.

Figura 7. **Molinete de tazón cónico**



Fuente: *Aforo en un cauce natural. Método del molinete.*
www.galeon.com/elregante2/aforo.html. Consulta: 20 de abril de 2015.

Figura 8. **Aforo con molinete**



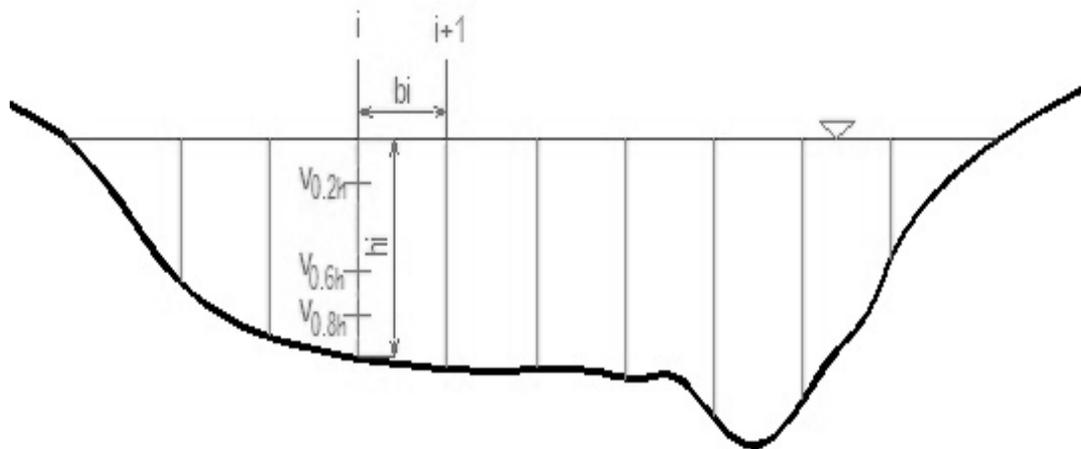
Fuente: *Aforo en un cauce natural. Método del molinete.* [www. Areas/hidro_mod1.htm](http://www.Areas/hidro_mod1.htm)
Consulta: 20 de abril de 2015.

Los procedimientos para medición de la velocidad media en flujo en una sección transversal con molinete, son los siguientes:

- Medir el ancho total del río.
- Dividir el ancho total del río en secciones parciales.
- Para cada sección parcial, se mide la profundidad del río.
- Según la profundidad del río, colocar a $0.2H$ o a $0.6H$ y $0.8H$ el molinete, donde H es la profundidad de la sección vertical. H es medido desde la parte inferior hasta la parte superior libre del agua.
- Realizar toma de tiempo y lectura del número de revoluciones.

En la figura 9 se ilustra una sección de aforo con molinete.

Figura 9. **Sección de aforo con molinete**



Fuente: OROZCO, Elfego. *Apuntes de hidrología*. p. 48

Los procedimientos para medición de caudal por medio de molinete son los siguientes:

- En cada punto de ubicación del molinete, se realiza el cálculo de velocidad con la ecuación proporcionada por el fabricante.
- Para el cálculo de la velocidad media, en cada una de las secciones parciales, se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = V_{0.6H} \text{ ó } V = \frac{V_{0.2H} + V_{0.8H}}{2}$$

- Para el cálculo del área de influencia, para cada sección parcial se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_i = \left(\frac{b_i + b_{i+1}}{2} \right) * h_i$$

- Para el cálculo de caudal en una sección parcial, se usa la siguiente fórmula:

$$q_i = A_i * V_i$$

- Para obtener el caudal total del río, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Q = \sum q_i$$

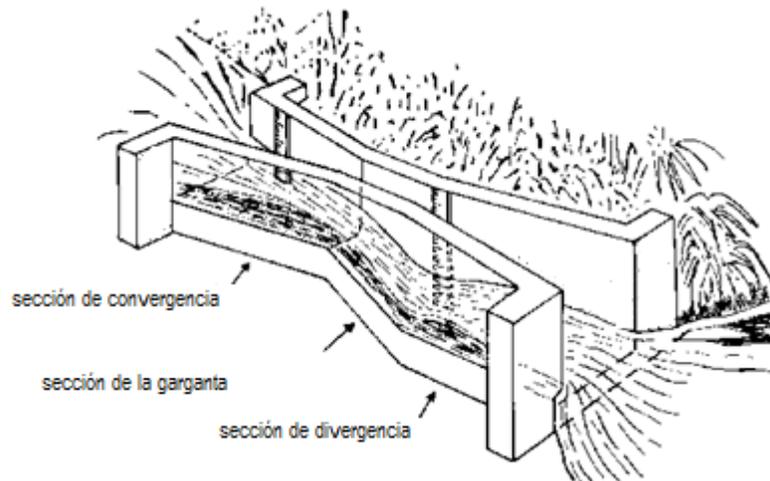
1.2.5. Canal parshall

El canal parshall es un aforador constituido por una sección de convergencia, garganta y una sección de divergencia. Los materiales para la construcción de un canal parshall pueden ser de fibra de vidrio, aluminio, acero, mampostería o concreto.

Según la magnitud del caudal, será el tamaño del canal parshall a utilizar; los de menor tamaño son usados para regular la descarga de agua en propiedades agrícolas y los de mayor tamaño son usados para grandes canales de riego.

Para el cálculo del caudal en un canal parshall, se tienen los valores del coeficiente "K" y "n", y "H" que proporciona el fabricante del canal.

Figura 10. **Canal Parshall**



Fuente: *Aforo en un cauce natural. Método de la canaleta Parshall.*
www.Areas/hidro_mod1.htm. Consulta: 20 de abril de 2015.

Según los experimentos y ensayos realizados por Azevedo y Guillermo Acosta, utilizando el canal Parshall se ha obtenido la ecuación para calcular el caudal de tipo potencial:

Donde

$$Q = KH^n$$

n = exponente

K= coeficiente

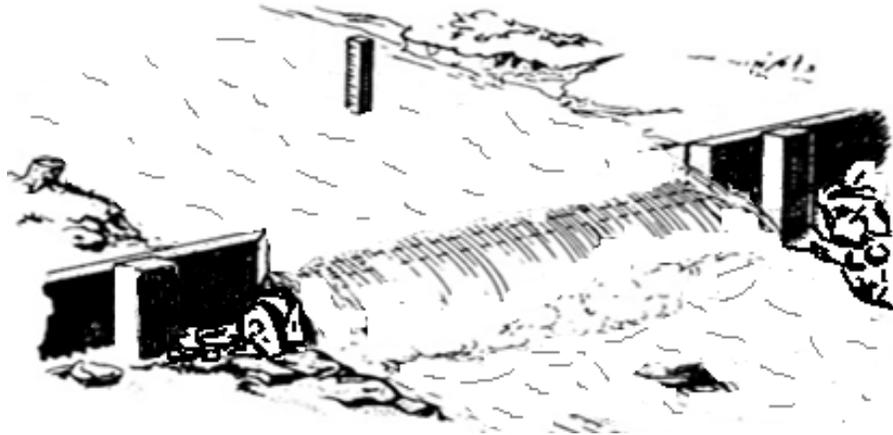
H= altura de garganta del canal

2. VERTEDEROS

2.1. Definición de vertederos

Un vertedero es una estructura hidráulica, que consiste en una placa cortada de forma regular a través de la cual pasa la corriente de agua. Los vertederos pueden clasificarse según la forma geométrica que se le da al momento del corte. Las formas geométricas más comunes en vertederos son triangulares, rectangulares, trapezoidales y parabólicas.

Figura 11. **Vertedero rectangular**



Fuente: Semantic scholar. *Vertedero*. www.saplensman.com/tecnoficion/mecanica/medicion-de-flujo-de-agua.php. Consulta: 4 de abril de 2015.

Un vertedero tiene el comportamiento de un dique que intercepta una corriente de agua de una superficie libre; esto causa una elevación de nivel del flujo aguas arriba en el canal, lo que permite obtener un mismo nivel para un tramo limitado. Los vertederos son utilizados para medir caudales que circulan en un canal abierto. El uso de los vertederos suele ser sencillo, económico y de fácil de instalación, por lo que el resultado de medición de caudales es efectivo.

2.2. Clasificación de vertederos

La clasificación de vertederos se refiere a su característica geométrica y ancho de pared son los factores que permiten su clasificación.

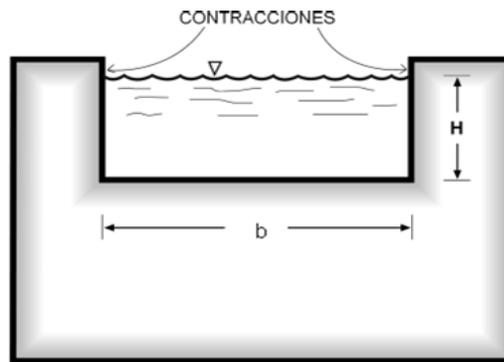
2.2.1. Forma geométrica

Según su forma geométrica se clasifican de la siguiente manera:

2.2.1.1. Simples

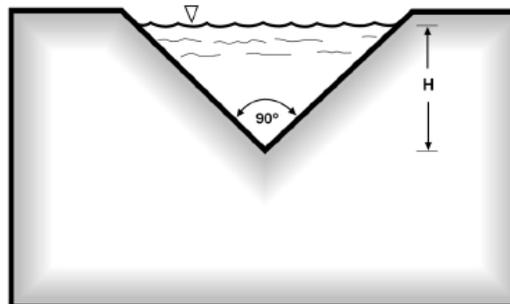
Se refiere a las formas geométricas no combinadas como se muestra en las figuras 12 y 13.

Figura 12. **Vertederos rectangulares**



Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 16

Figura 13. **Vertederos triangulares**

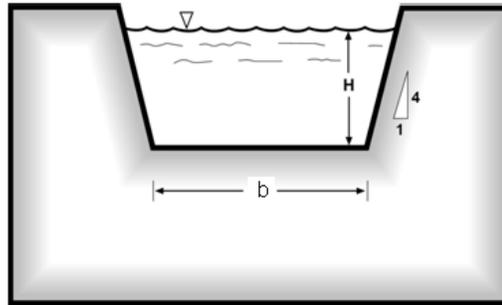


Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 17

2.2.1.2. **Compuestos**

Se constituyen por secciones geométricas combinadas como se muestran en la figura 14.

Figura 14. **Vertederos trapezoidales**



Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 18

2.2.2. Ancho de pared

La clasificación por ancho de pared dependerá de los tipos de materiales utilizados en su construcción dependiendo de la aplicación y el diseño de mismo. Se clasifican de la siguiente manera:

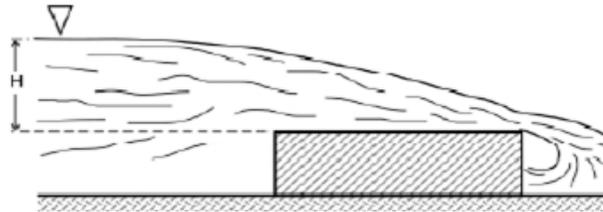
2.2.2.1. Pared ancha

También llamada vertedero de cresta ancha. Se considera de pared ancha cuando la vena adherente se establece al paralelismo de los filetes. También debe satisfacer la siguiente desigualdad.

$$0.08 \leq \frac{H_1}{L} \leq 0.5$$

Como se ilustra en la figura 15.

Figura 15. **Vertedero de pared ancha**



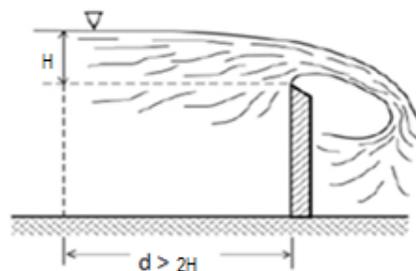
Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 10.

2.2.2.2. **Vertederos de pared delgada**

También en algunos textos se conocen como vertederos de cresta aguda. Estos vertederos son construidos con materiales de paredes delgadas como lámina, madera, fibra de vidrio y otros, que puedan ser biselados, esto permite que el flujo o manto salga libremente de la cresta del vertedero sin que escurra. Los vertederos de pared delgada son utilizados para mediciones por su buena precisión, siempre que su instalación sea de la mejor manera.

En la figura 16 se ilustran las características de un vertedero de pared delgada.

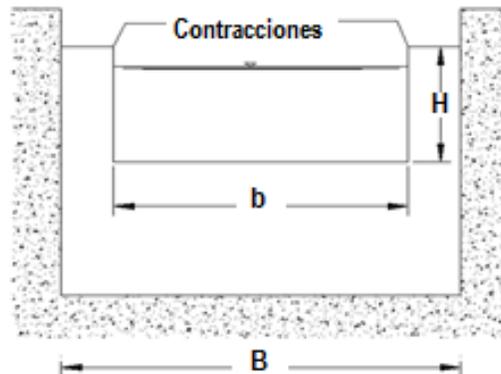
Figura 16. **Vertedero de pared delgada**



Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 9.

2.2.3. Terminología de vertedero rectangular

Figura 17. Terminología de vertedero



Fuente: Aforo. Vertederos de pared aguda. www.galeon.com/elregante/aforo.html. Consulta: 29 de abril de 2015.

Donde:

- Cresta (b): se denomina al borde horizontal también llamado umbral.
Contracción: lo constituyen los bordes o caras verticales del vertedero.
Carga (H): es la altura que pasa sobre el ancho de solera.
Ancho (B): ancho total libre del canal.

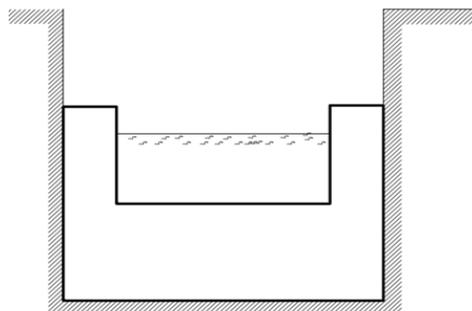
2.2.4. Vertedero rectangular de pared delgada

El vertedero rectangular es uno de los más sencillos para construir. Es un corte rectangular ubicado simétricamente en una placa delgada perpendicular a los lados, por este motivo es uno de los más utilizados. Requiere una carga bastante alta para poder utilizar la ecuación de Francis. En esta categoría de vertedero hay tres subdivisiones:

2.2.4.1. Totalmente contraídos

Es aquel que sus lados y fondo están lo suficientemente lejos de la cresta vertedora, de tal forma que no tengan efecto sobre la contracción de la lámina vertedora. La figura 18 ilustra un vertedero totalmente contraído.

Figura 18. **Totalmente contraído**

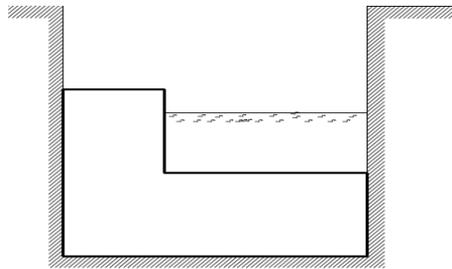


Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. vol. 1. p. 24.

2.2.4.2. Parcialmente contraído

Es el que tiene una contracción de la lámina vertedora que no se desarrolló completamente como consecuencia de la proximidad de las fronteras del canal. La figura 19 ilustra un vertedero parcialmente contraído.

Figura 19. Parcialmente contraído

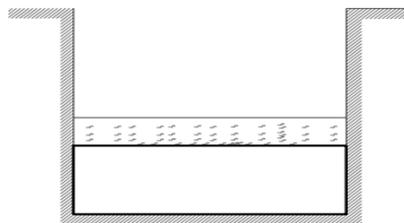


Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. vol. 1. p. 244.

2.2.4.3. Sin contracción

Es aquel en el cual el corte se extiende completamente a través de las fronteras del canal. La figura 20 ilustra un vertedero totalmente libre.

Figura 20. Sin contracción



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. vol. 1. p. 243.

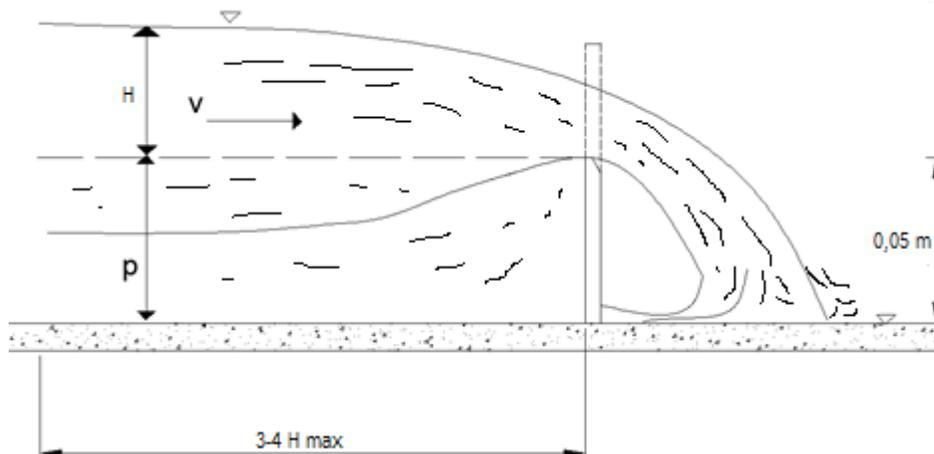
2.2.5. Limitaciones en vertedero rectangular

Deben tomarse en cuenta las siguientes limitaciones en el uso de este tipo de vertedero:

- El valor mínimo recomendado de H es aproximadamente 0,1ft (0,03m). Este límite se deriva de una consideración sobre la precisión en la que se puede medir H relativa a la influencia de la viscosidad y tensión superficial del flujo.
- Si la relación de H/p, donde p es la distancia desde el fondo del canal a la cresta, excede a 5, el tirante crítico puede presentarse en el canal de llegada e invalidar las suposiciones con las cuales se obtuvo. Se recomienda para medir en forma precisa el gasto $H/p \leq 2$ y $p \geq 0,30$ ft (0,10m)
- El ancho del vertedor debe exceder los 0,50 ft (0,15m), esto es:
$$b \geq 0,50 \text{ ft}$$
- A causa de los requisitos de erosión, el nivel aguas abajo del vertedor debe estar, por lo menos, a 0,16 ft (0,05m) debajo de la elevación de la cresta del vertedor.

En la figura 21 se ilustra la sección del vertedero de cresta delgada.

Figura 21. **Sección de vertedero**



Fuente: elaboración propia, utilizando el programa AutoCAD.

2.2.6. **Instalación de vertederos rectangulares**

La instalación de los vertederos rectangulares debe seguir las siguientes condiciones:

- El vertedero debe colocarse en el extremo inferior de un canal lo suficientemente ancho y profundo como para introducir una corriente continua y suave con una velocidad inferior a 0,15 m/s. Lo cual equivale a aguas tranquilas. A veces esta norma se expresa al requerir un área en el canal 8 veces el área de la escotadura.
- El eje de la caja del vertedero debe ser paralelo a la dirección de la corriente.
- La pared del vertedero debe ser perpendicular a la dirección de la corriente.

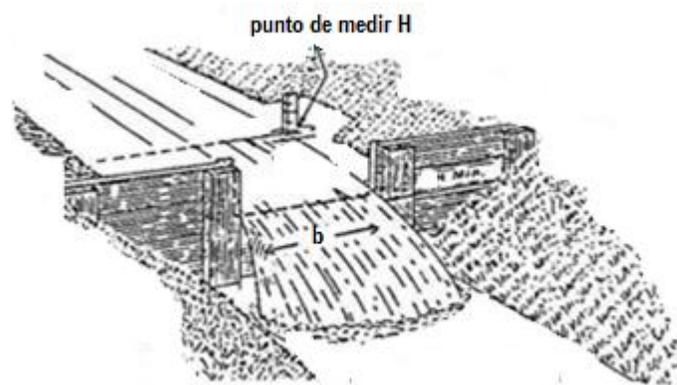
- La cresta del vertedero debe quedar perfectamente horizontal de forma que la lámina de agua tenga el mismo espesor en toda su anchura.
- El borde aguas arriba debe ser afilado para que el agua que cae lo toque en un solo punto.
- La distancia de la cresta al fondo del embalse ha de ser dos veces el espesor de la lámina de agua que rebosa por ella.
- La distancia desde las paredes del embalse de remanso a los extremos de la cresta deberá ser superior a dos veces el espesor de la lámina de agua.
- Para aforos exactos se ha de procurar que el espesor de la lámina de agua sobre la cresta no sea superior a un tercio de la longitud de esta.
- La profundidad del agua sobre la cresta no debe ser inferior a 5 cm.
- 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 (un mínimo de 6 cm.); 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 el vertedero está sumergido y los aforos con vertederos sumergidos no son dignos de confianza.
- El medidor de altura de carga (H) debe de ser instalado antes del vertedero, a una distancia mayor o igual a $4H$ para que no se vea afectado por la curva de descanso del agua a medida que se acerca al

vertedero. El punto cero del medidor fija el nivel más bajo como se ilustra en la figura 23.

- Para evitar arrastres y erosiones de la acequia aguas abajo del vertedero por agua del salto, se deberán proteger sus paredes con piedras u otros materiales.

En las figuras 22 y 23, se ilustra las características de instalación de vertederos rectangulares.

Figura 22. **Instalación de vertederos**

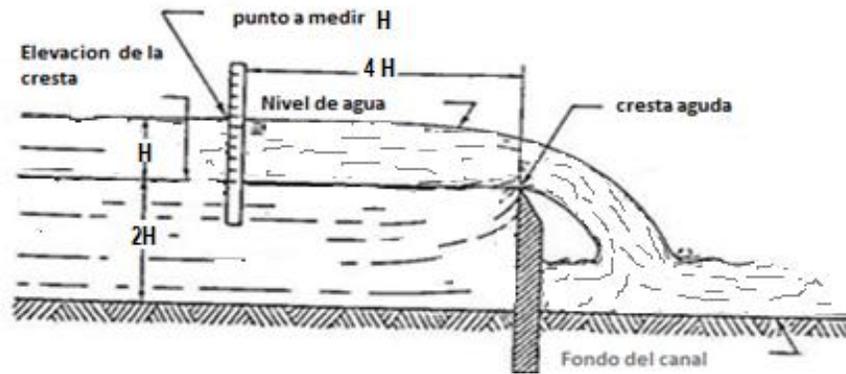


Fuente: *Vertederos de pared*

delgadafluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/medidores/vertpareddelg/vertpareddelg.html

Consulta: 4 de abril de 2015.

Figura 23. Características de instalación



Fuente: *Vertederos de pared delgada*.

fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/medidores/vertpareddelg/vertpareddelg.html

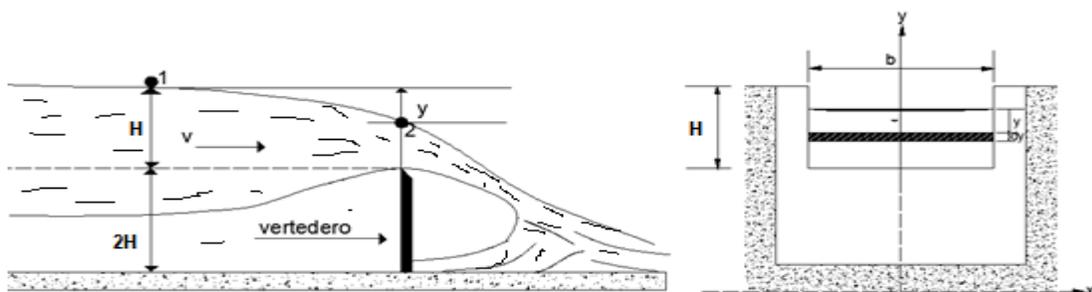
Consulta: 4 de abril de 2015.

2.3. Ecuaciones para el cálculo de caudal para vertedero rectangular

Para esta forma de vertedero es del tipo $x = \frac{b}{2}$ donde b es la longitud de la

cresta se ilustra en la figura 24.

Figura 24. Sección de vertedero rectangular



Fuente: elaboración propia utilizando programa AutoCAD.

Aplicando la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

Donde $v_1 = 0$

Donde a las presiones $P_1 = P_2 = P_{atm}$

Haciendo referencia, que los dos puntos se encuentran a la misma presión

$$Z_1 = p + H$$

$$Z_2 = p + H - y$$

Sustituyendo en la ecuación, queda de la siguiente manera:

$$0 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} + z_2$$

$$0 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + 0 + z_2 \rightarrow z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

Sustitución de valores de z_1 y z_2

$$z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow p + H = \frac{v_2^2}{2g} + (p + H - y)$$

$$p + H = \frac{v_2^2}{2g} + (p + H - y) \rightarrow p + H - (p + H - y) = \frac{v_2^2}{2g}$$

$$p + H - (p + H - y) = \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow y = \frac{v_2^2}{2g}$$

$$y = \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow 2gy = v_2^2 \rightarrow \sqrt{2gy} = v_2$$

$$v_2 = \sqrt{2gy}$$

$$Q = V * A$$

Donde: $V = \sqrt{2gy}$

$$A = (b)(y) \rightarrow dA = (b)(dy)$$

$$Q = \int_0^h b(2gH - y)^{\frac{1}{2}} dy$$

$$Q = \sqrt{2g} \int_0^h b(H - y)^{\frac{1}{2}} dy$$

Donde v es la velocidad referente a cada tirante

Sustituyendo $v = (H - y)dy = -du$

$$Q = -\sqrt{2gb} \int_0^h (u)^{\frac{1}{2}} du$$

Integrando

$$Q = -\sqrt{2gb} \left[\frac{u^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{2}} \right]_0^h$$

Al sustituir $u = (H - y)$

$$Q = -\frac{2}{3}\sqrt{2g} b \left[(H - y)^{\frac{3}{2}} \right]_0^h$$

La deducción final de la ecuación es:

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2gb}H^{\frac{3}{2}}$$

Ec.1

La ecuación general para el cálculo de caudal en un vertedero de pared delgada sin contracciones. Por lo que, se pueden agrupar los otros términos de $\frac{2}{3}\sqrt{2g}$ μ en término de un solo coeficiente C, de tal forma que:

$$Q = CbH^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec.2}$$

Para efecto de un vertedero rectangular que su ancho de solera sea menor que el ancho del canal, se producen contracciones laterales semejantes a las de un orificio. En la figura 24 se ilustra un vertedero con dos contracciones por lo que es necesario hacer una modificación a la ecuación 2 y utilizar la carga total de h de la siguiente manera:

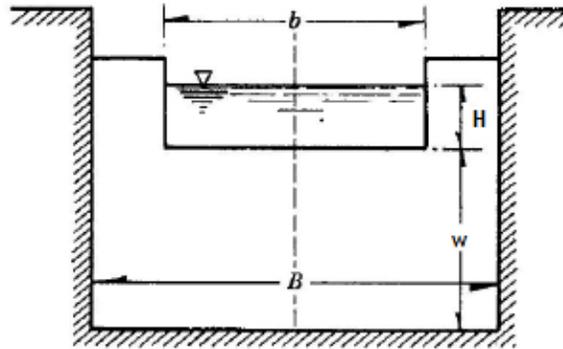
$$h = H + \frac{V_0^2}{2g}$$

Se sustituye h minúscula por H mayúscula en la ecuación 2

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}b(h)^{\frac{3}{2}}$$

Donde H equivale a $H + \frac{V_0^2}{2g} \rightarrow Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}b\left(H + \frac{V_0^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec.3}$

Figura 25. **Vertedero rectangular con dos contracciones**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. Vol. 1. p. 244.

La ecuación anterior, se puede reescribir de la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} b H^{\frac{3}{2}} = K \sqrt{2g} b H^{\frac{3}{2}}$$

Ec.4

Diferentes autores han investigado y obtenido fórmulas experimentales para evaluar μ , en las cuales se incluya dicho efecto para permitir que tales ecuaciones conserven su validez. La más utilizada según Azevedo y Acosta en el manual de hidráulica es la de Francis:

Donde μ equivale a.

$$\mu = 0,623 \left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right)$$

Al sustituir μ en la ecuación 4 se obtiene lo siguiente:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left(0,623 \left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right) \right) b h^{3/2}$$

Al sustituir $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2(9,81)} \left(0,623 \left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right) \right) b h^{3/2}$$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{19,62} \left(0,623 \left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right) \right) b h^{3/2}$$

$$Q = \frac{2}{3} (4,429) (0,623) \left(\left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right) \right) b h^{3/2}$$

$$Q = \frac{2}{3} (2,7592) \left(\left(1 - 0,1 * n * \frac{H}{b} \right) \right) b h^{3/2}$$

$$Q = \frac{2}{3} (2,7592) \left(\frac{b - 0,1 * n * H}{b} \right) b h^{3/2}$$

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

Ec.5

Donde

Q= caudal que fluye en el canal en m^3/s

b= ancho de solera del vertedero en m

H= la carga de agua sobre el vertedero en m

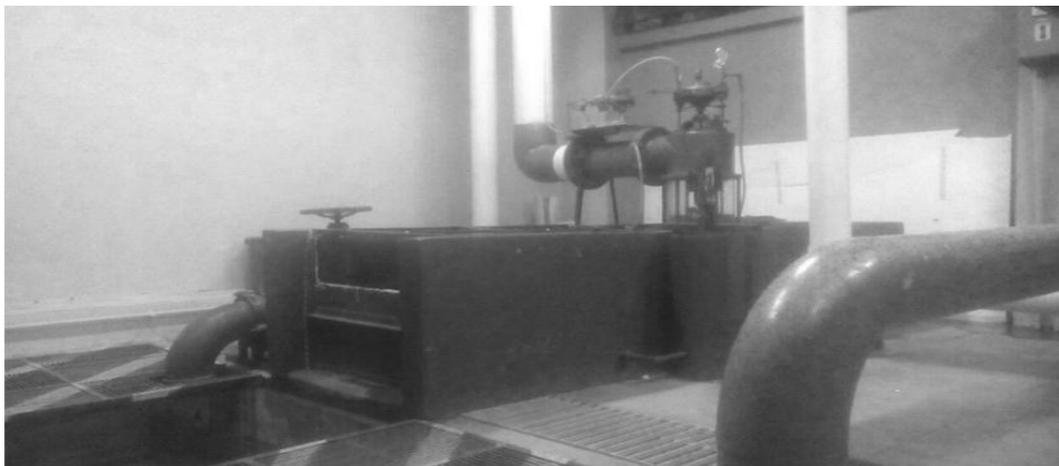
n= el número de contracciones del vertedero (0,1 o 2)

3. ENSAYO DE VERTEDEROS RECTANGULARES

3.1. Descripción del equipo para los ensayos de vertederos rectangulares con dos contracciones

Para la realización de los ensayos se empleó el canal ancho existente en el Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, de la cual el flujo de agua es suministrado por un sistema de bombeo con una capacidad de 20 l/s, para así tener una corriente de agua de mayor fluidez y poder realizar variación de tirante para cada vertedero a ensayar.

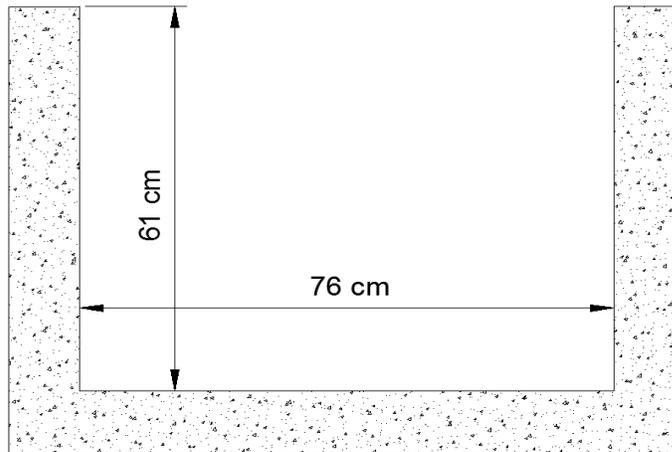
Figura 26. Canal rectangular



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, Facultad de Ingeniería, USAC.

El canal cuenta con sección rectangular cuyas dimensiones internas se presentan en la figura 27.

Figura 27. **Dimension interna del canal rectangular**

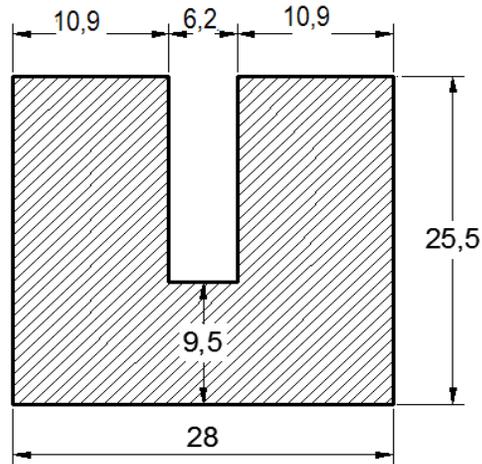


Fuente: elaboración propia utilizando programa AutoCAD.

3.1.1. Diseño y dimensiones de los vertederos rectangulares con dos contracciones

Se diseñaron y se construyeron nueve vertederos rectangulares (V.R.) de pared delgada con dos contracciones. Se utilizó lámina de acero de $\frac{1}{4}$ de cm de espesor y pintura anticorrosiva para su recubrimiento. Las dimensiones de los vertederos fueron tomadas del modelo del canal implementado y las dimensiones de las contracciones fueron calculadas desde el eje central de ancho del canal hacia los lados a una distancia de 5 cm a 55 cm. Se ilustran en las figuras de la 28 a la 44.

Figura 28. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 6,2 cm**



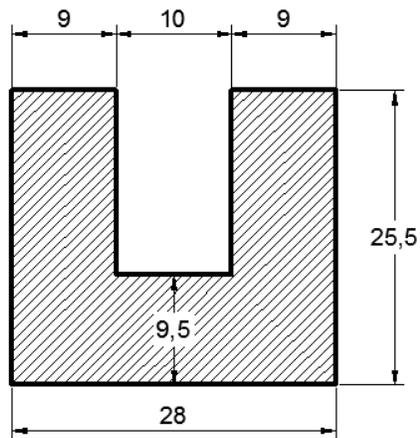
Fuente: elaboración propia utilizando programa AutoCAD.

Figura 29. **V.R. construido**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 30. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 10 cm**



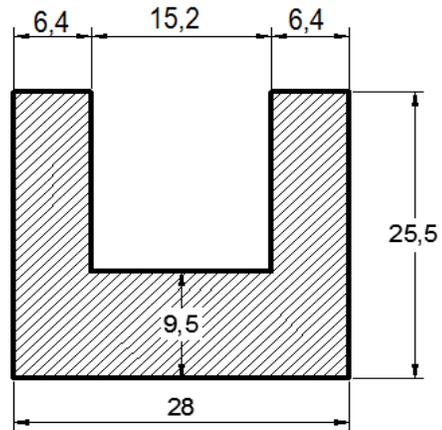
Fuente: elaboración propia utilizando programa AutoCAD.

Figura 31. **V.R. construido**



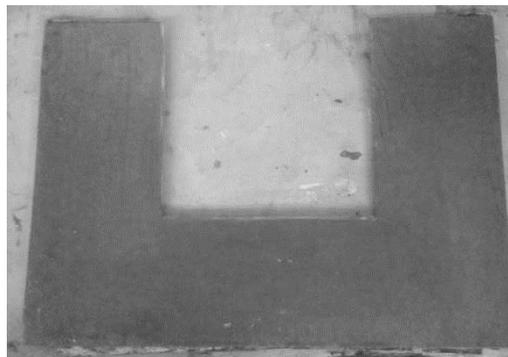
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC

Figura 32. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 15,2 cm**



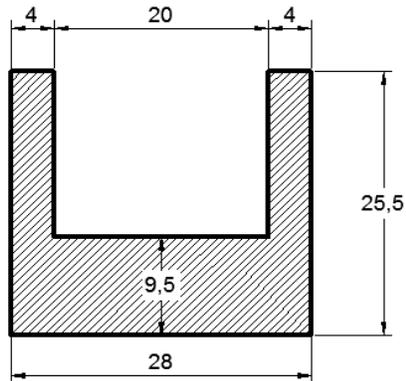
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 33. **V.R. construido**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 34. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 20 cm**



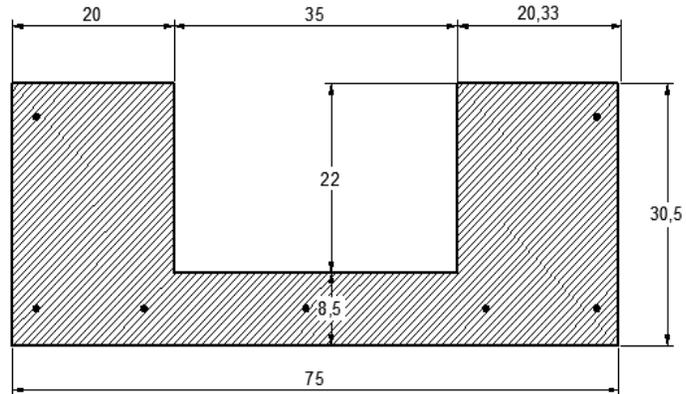
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 35. **V.R. construido**



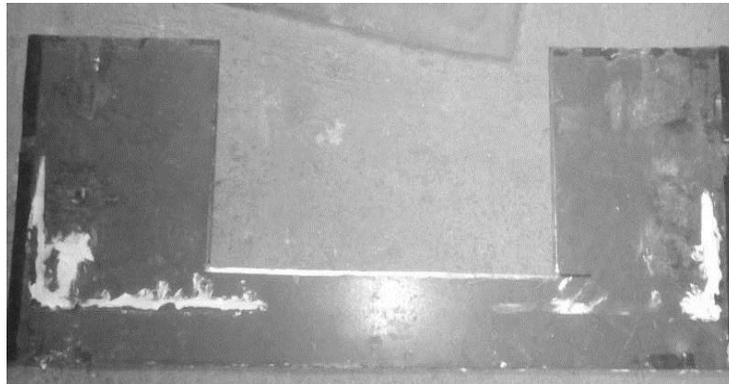
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 36. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 35 cm**



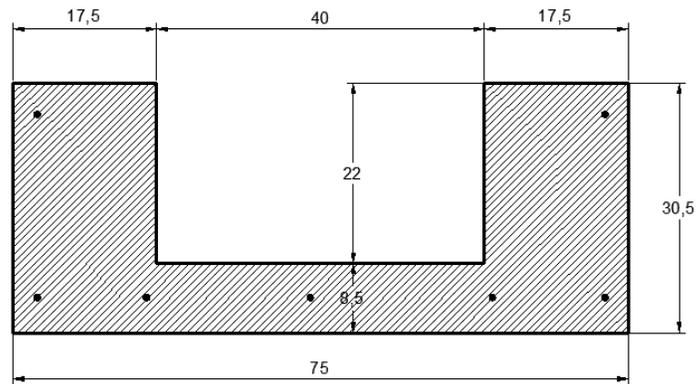
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 37. **V.R. construido**



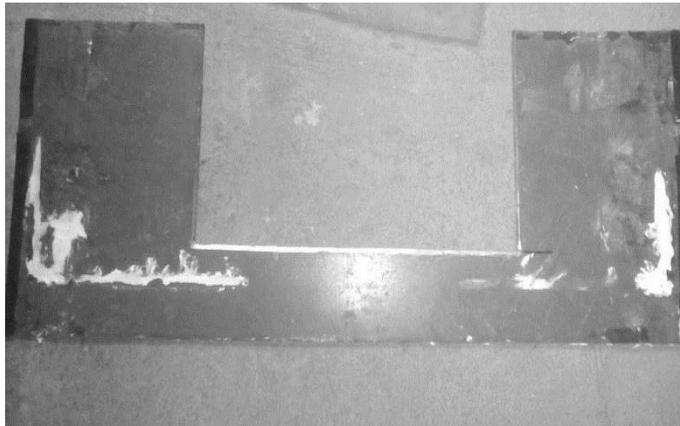
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 38. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 40 cm**



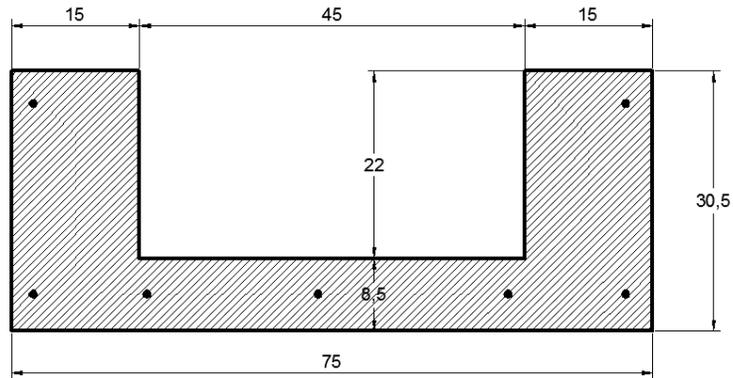
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 39. **V.R. construido**



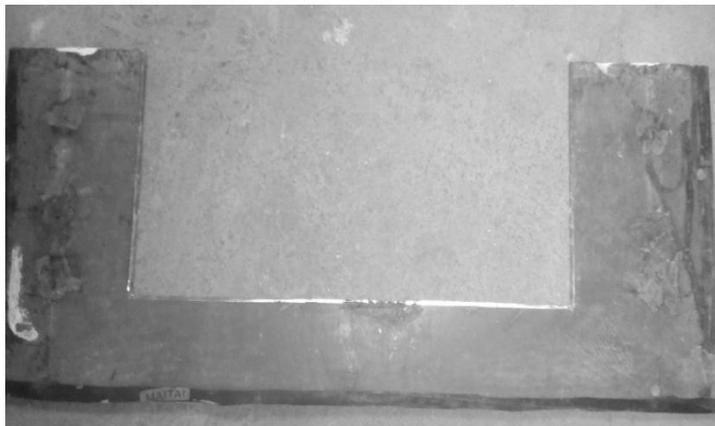
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 40. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 45 cm**



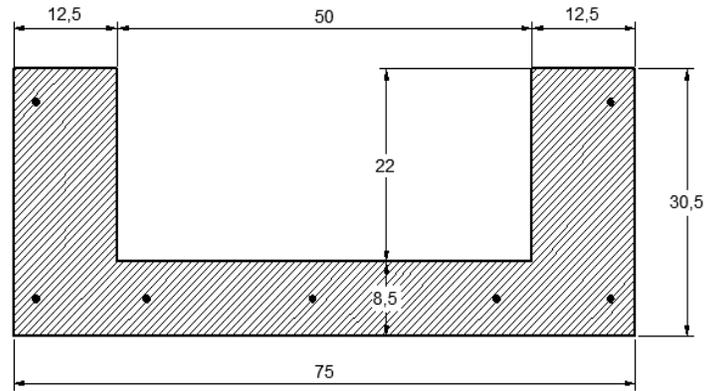
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 41. **V.R. construido**



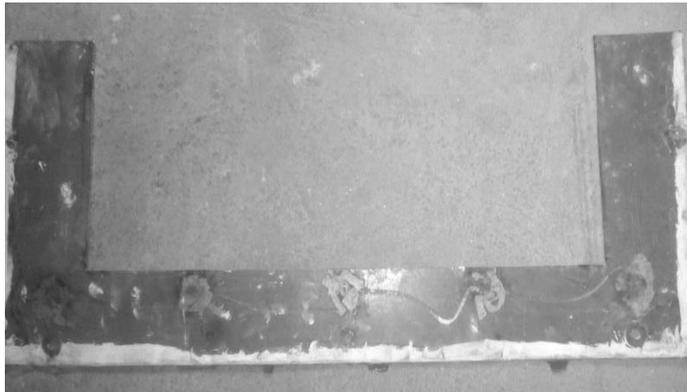
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos en Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 42. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 50 cm**



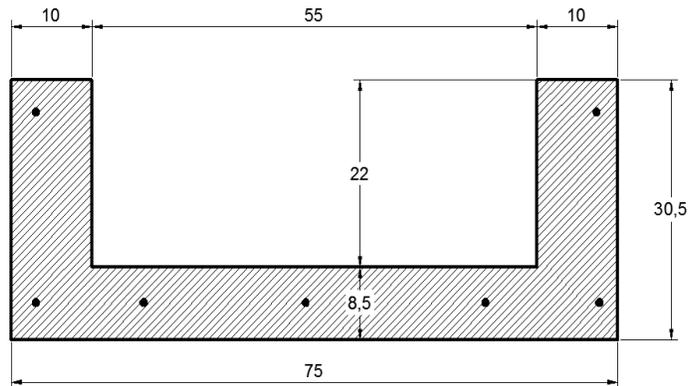
Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 43. **V.R. construido**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 44. **Diseño de V.R. con ancho de solera de 55 cm**



Fuente: elaboración propia empleando programa AutoCAD.

Figura 45. **V.R. construido**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

3.2. Ensayo y calibración de los vertederos rectangulares de distintos anchos de solera

Estas prácticas se realizaron con el equipo del Laboratorio de Mecánica de Fluidos e hidráulica de la Facultad de Ingeniería el cual cuenta con un canal con un ancho de 76 cm, y donde se pueden instalar los vertederos de ancho de soleras desde 25 cm hasta 65 cm; además, cuenta con un pozo tranquilizador.

No se puede realizar ensayo de ancho de solera menor de 25 cm por rebasamiento en el canal; por lo que es necesario utilizar otro canal de ancho menor, en este caso de 25 cm de ancho. Ambos canales cuentan con un tanque calibrado que es utilizado para el aforo volumétrico y cuenta con un sistema de bombeo. Estos equipos pertenecen al Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería.

3.2.1. Realización de los ensayos

- Fijar el vertedero rectangular al canal con tuercas y caucho como sellador para evitar filtraciones en sus bordes que pudieran afectar las lecturas.

Figura 46. **V.R. instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

- Encender la bomba y suministrar agua al canal hasta llegar al nivel de la cresta. Esta altura de carga se denominará H_0 , a partir de la cual se empezarán a tomar lecturas.

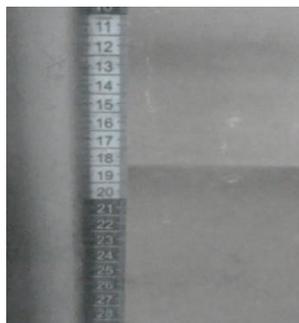
Figura 47. **Zona aireada bajo la lámina vertiente**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

- Realizar toma de lecturas de carga H . Para cada lectura se realizarán 3 aforos volumétricos. Tomar lectura de los tiempos de llenado, con un cronómetro.

Figura 48. **Toma de lectura de la carga H**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 49. **Depósito utilizado para aforo volumétrico**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figura 50. **Toma de lectura de volumen de agua**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

3.2.2. Calibración de vertederos

Uno de los objetivos de la calibración de los vertederos es deducir la ecuación de descarga para cada vertedero de forma experimental, para luego obtener un modelo matemático preciso que relacione la descarga del vertedero con la altura sobre del mismo y también con el ancho de solera.

3.2.3. Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 6,2 cm

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestra en la tabla I, se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Figura 51. **V.R. con ancho de solera de 6,2**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica. Facultad de Ingeniería. USAC.

Tabla I. **Datos obtenidos en ensayos de V.R. de solera de 6,2**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,50	487,50	209,28	489,34	209,97	492,65	210,67
3,30	327,47	209,28	332,94	209,97	333,22	209,97
4,30	216,81	211,36	216,93	210,67	219,87	212,06
5,40	152,47	211,36	157,13	212,76	159,35	213,45
6,60	111,18	212,06	112,52	213,45	112,93	213,45
7,80	85,92	209,97	86,71	211,36	88,05	212,06
9,70	59,96	209,97	61,00	208,58	61,55	209,28
11,10	52,50	211,36	50,99	209,28	52,89	211,36

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

V= litros

t = segundos

En el siguiente ejemplo se presenta el cálculo para obtener el caudal real observado cuando el tirante es 2,5 cm, para un ancho de 6,2 cm.

$$Q_{obs} = \left(\frac{\frac{209,28}{487,5} + \frac{210,67}{492,65} + \frac{209,97}{489,39}}{3} \right) = 0,429 \text{ l/s}$$

Tabla II. Caudales observados de V.R. de solera de 6,2

H (cm)	Q _{r 1} (l/s)	Q _{r 2} (l/s)	Q _{r 3} (l/s)	< Q _{obs} > (l/s)
2,50	0,429	0,429	0,428	0,429
3,30	0,639	0,631	0,630	0,633
4,30	0,975	0,971	0,964	0,970
5,40	1,386	1,354	1,340	1,360
6,60	1,907	1,897	1,890	1,898
7,80	2,444	2,438	2,408	2,430
9,70	4,026	4,104	3,996	3,440
11,10	4,026	4,104	3,996	4,042

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

Donde: Q= caudal que fluye en el canal en m³/s
 b= ancho de solera del vertedero en m
 h= la carga de agua sobre el vertedero en m
 n= el número de contracciones del vertedero (0,1 o 2)

En el siguiente ejemplo, se presenta el cálculo para obtener el caudal teórico cuando el tirante es 2,5 cm, para un ancho de 6,2 cm.

$$Q_t = 1,84 * [0,062 - (0,1 * 2 * 0,025)] * (0,025)^{3/2} * \left(\frac{1000l}{1m^3}\right)$$

$$Q_t = 0,415 \frac{l}{s}$$

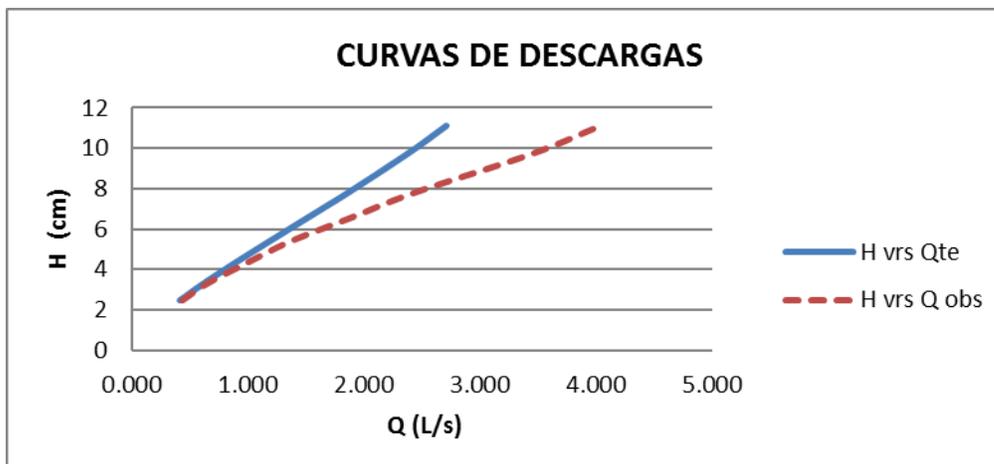
Tabla III. Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 6,2

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
2,50	0,415	0,429
3,30	0,611	0,633
4,30	0,876	0,970
5,40	1,182	1,360
6,60	1,522	1,898
7,80	1,860	2,430
9,70	2,368	3,440
11,10	2,708	4,042

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla III se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 52. Curvas de descargas de V.R de solera de 6,2



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observan que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

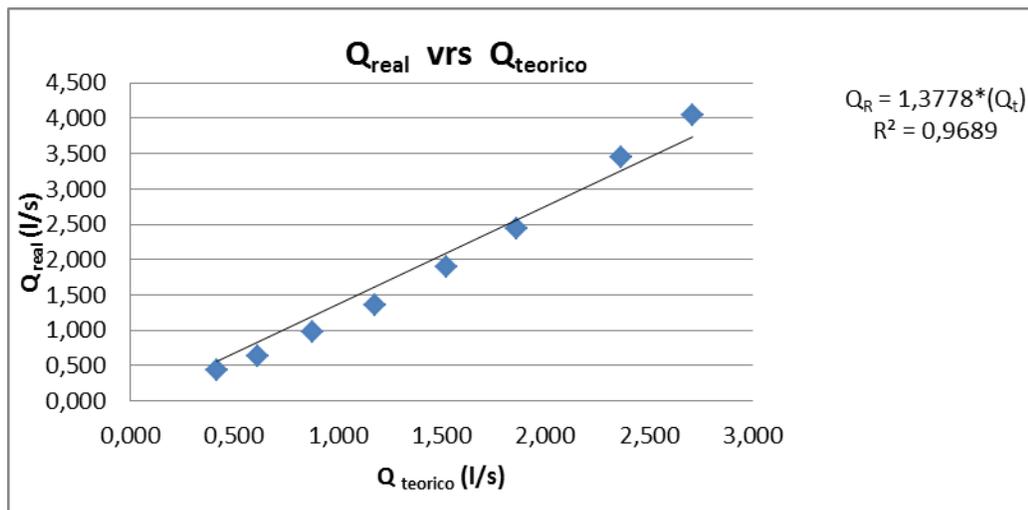
$$Q_{real} = C_d * Q_t$$

Donde:

C_d = coeficiente de descarga

Q_t = caudal teórico

Figura 53. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera 6,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 6,2 (cm), el cual es de:

$$C_d = 1,3778$$

Quedando la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,3778 * 0,018 * (6,2 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

$$Q_{real} = 0,0248 * (6,2 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = l/s$

H= cm

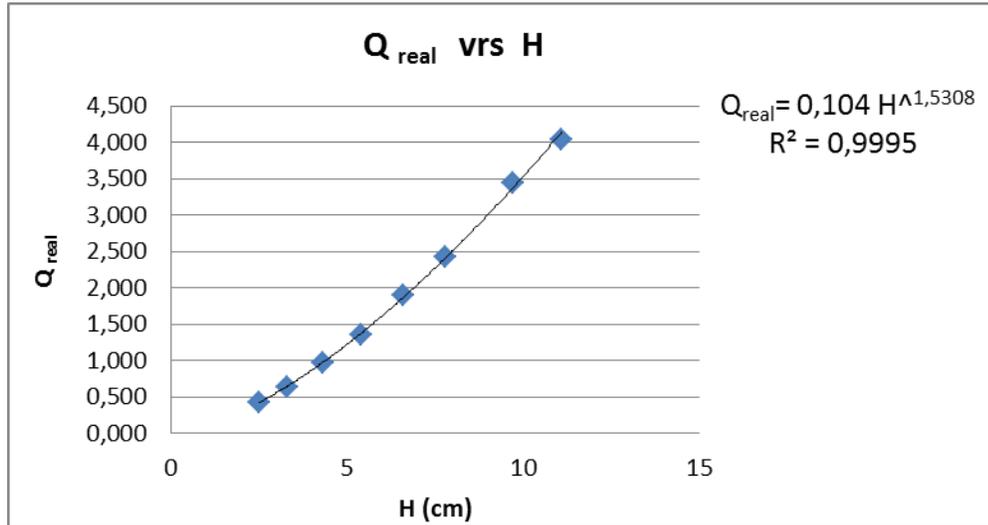
Para obtener la ecuación experimental, como en la mayoría de los medidores de caudales, el modelo utilizado es de tipo potencial, la cual se define de la siguiente forma

$$Q_{real} = KH^n$$

El valor de **H** es la altura de cada tirante, los valores de **k** y **n**, se obtiene por medio del coeficiente de correlación generada con el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación.

En la siguiente representación gráfica se presenta la relación caudal real observado versus **H**.

Figura 54. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera 6,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,104H^{1,5308}$$

Donde:

$$Q_{real} = l/s$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado, que se muestra en la tabla IV.

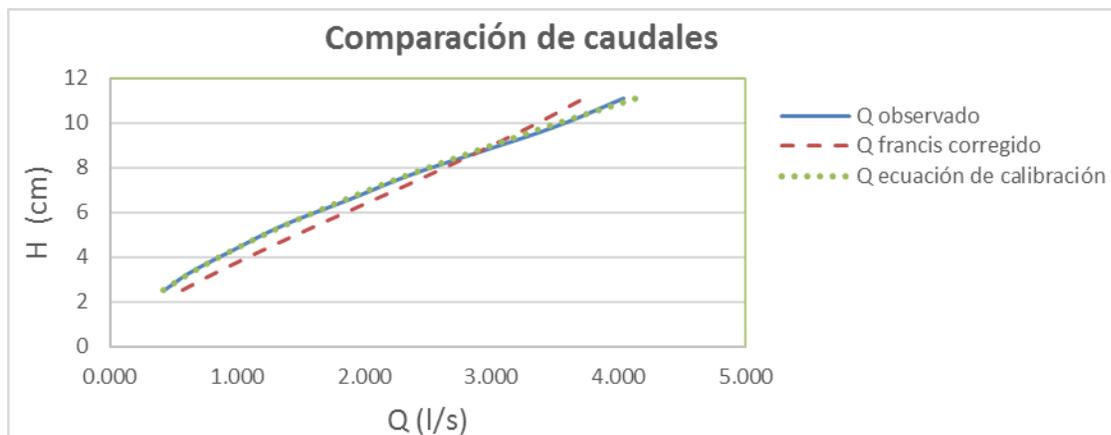
Tabla IV. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
2,50	0,429	0,571	33,250	0,423	1,354
3,30	0,633	0,842	32,949	0,647	2,135
4,30	0,970	1,207	24,424	0,970	0,022
5,40	1,360	1,620	19,770	1,375	1,080
6,60	1,898	2,098	10,512	1,869	1,540
7,80	2,430	2,563	5,456	2,414	0,674
9,70	3,440	3,263	5,168	3,370	2,058
11,10	4,042	3,731	7,688	4,142	2,471

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla IV.

Figura 55. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.4. Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 10 cm

Con los datos obtenidos en el ensayo que se indican en la tabla V se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla V. Datos obtenidos en ensayos de V.R. de solera de 10

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,00	90,38	108,2	121,09	131,65	150,54	160,69
3,50	59,81	86,19	89,84	124,75	120,13	157,92
4,00	93,66	154,46	70,40	117,85	53,44	86,87
4,50	41,84	84,81	60,94	120,61	82,82	161,38
5,00	41,41	101,32	67,22	158,61	86,78	200,93
5,50	31,38	84,12	63,46	164,15	81,25	207,88
8,2 0	44,75	210,67	45,47	212,76	46,87	216,24
9,70	37,29	216,96	37,37	216,96	40,25	230,17

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo de cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma.

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

V = litros

t = segundos

Tabla VI. **Caudales observados de V.R. de solera de 10**

H (cm)	Q_{r1} (l/s)	Q_{r2} (l/s)	Q_{r3} (l/s)	$\langle Q_{obs} \rangle$ (l/s)
3,00	1,197	1,087	1,067	1,117
3,50	1,441	1,389	1,315	1,381
4,00	1,649	1,674	1,626	1,650
4,50	2,027	1,979	1,949	1,985
5,00	2,447	2,360	2,315	2,374
5,50	2,681	2,587	2,559	2,609
8,20	4,708	4,679	4,614	4,667
9,70	5,818	5,806	5,719	5,781

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

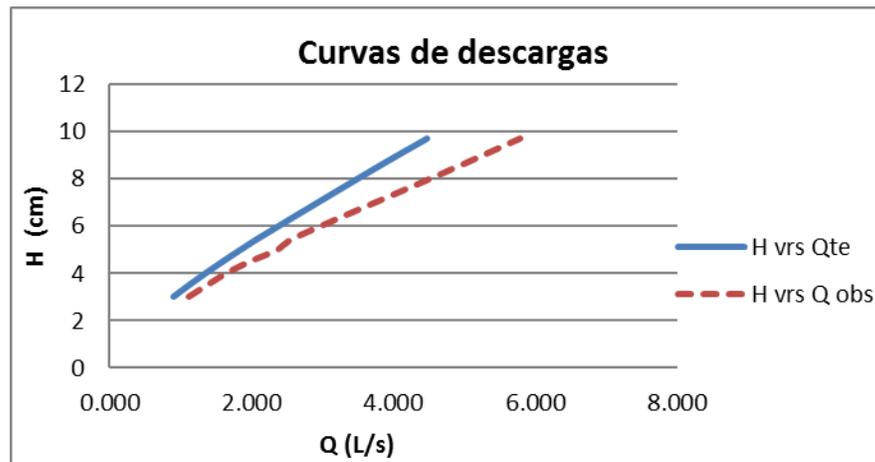
Tabla VII. **Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 10**

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
3,00	0,899	1,117
3,50	1,120	1,381
4,00	1,354	1,650
4,50	1,598	1,985
5,00	1,851	2,374
5,50	2,112	2,609
8,20	3,612	4,667
9,70	4,480	5,781

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla VII, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y del caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 56. **Curvas de descargas de V.R. de solera de 10**

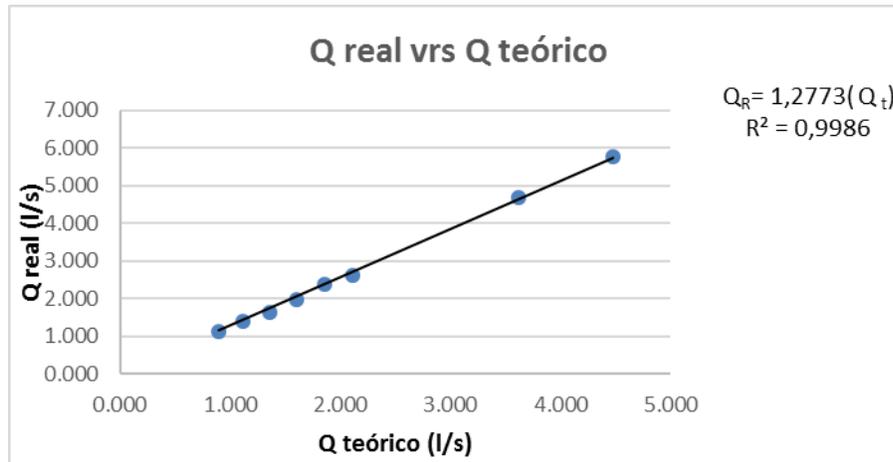


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observan que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 57. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 10**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 10 cm, el cual es de:

$$C_d = 1,2773$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,2773 * 0,0184 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

$$Q_{real} = 0,0235 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

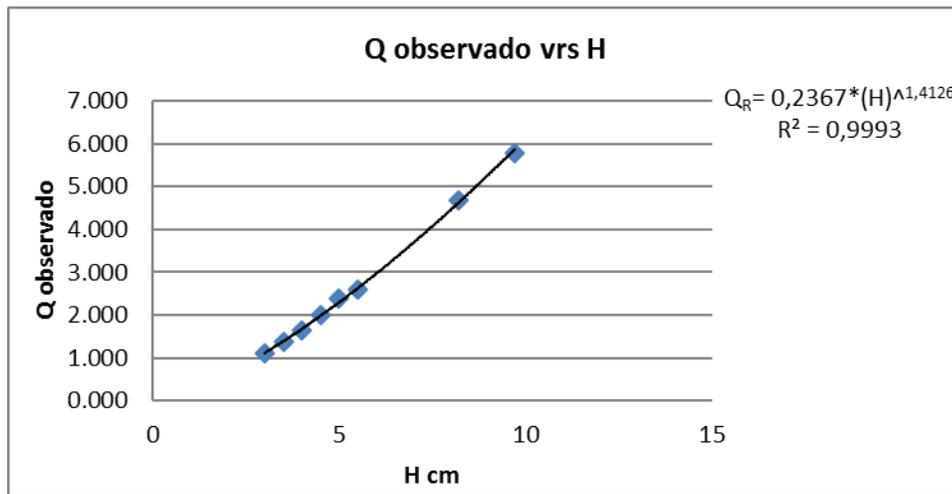
$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Como se mencionó, anteriormente, para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el

programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 58. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 10**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{rsal} = 0,2367H^{1,4126}$$

Donde:

$$Q_{rsal} = l/s$$

$$H = cm$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado, que se muestra en la siguiente tabla VIII.

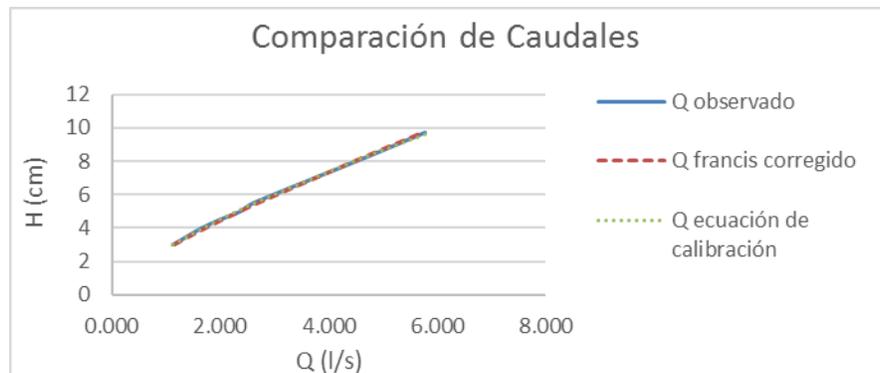
Tabla VIII. **Comparación de caudales de V.R de solera de 10**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
3,00	1,117	1,148	2,745	1,117	0,005
3,50	1,381	1,431	3,603	1,389	0,560
4,00	1,650	1,730	4,861	1,678	1,694
4,50	1,985	2,042	2,856	1,981	0,187
5,00	2,374	2,365	0,380	2,299	3,150
5,50	2,609	2,698	3,426	2,630	0,838
8,20	4,667	4,614	1,140	4,624	0,910
9,70	5,781	5,723	1,004	5,863	1,420

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla VIII.

Figura 59. **Comparación de caudales de V.R. de solero de 10**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.5. Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 15,2 cm

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestra en la tabla IX se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla IX. Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 15,2

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,50	86,91	106,14	90,00	109,58	95,19	115,78
3,10	39,41	75,20	43,60	82,06	49,53	91,00
3,90	40,50	98,56	43,87	106,82	49,03	118,54
5,10	29,16	99,25	32,50	110,96	34,41	117,16
6,10	21,66	101,32	25,09	107,16	28,85	133,03
6,90	20,72	114,40	27,60	152,38	25,44	138,56
8,00	18,69	130,27	27,68	192,59	22,44	155,84
8,60	15,59	128,28	18,38	150,31	20,41	166,23

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo de cada uno de los tirantes se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma.

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

V= litros

t = segundos

Tabla X. **Caudales observados de V.R. de solera de 15,2**

H (cm)	Q_{r1} (l/s)	Q_{r2} (l/s)	Q_{r3} (l/s)	$\langle Q_{obs} \rangle$ (l/s)
2,50	1,221	1,218	1,216	1,218
3,10	1,908	1,882	1,837	1,876
3,90	2,434	2,435	2,418	2,429
5,10	3,404	3,414	3,405	3,408
6,10	4,678	4,271	4,611	4,520
6,90	5,521	5,521	5,523	5,522
8,00	6,970	6,958	6,945	6,958
8,60	8,228	8,178	8,145	8,184

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1.84 * (b - (0.1 * n * H))H^{3/2}$$

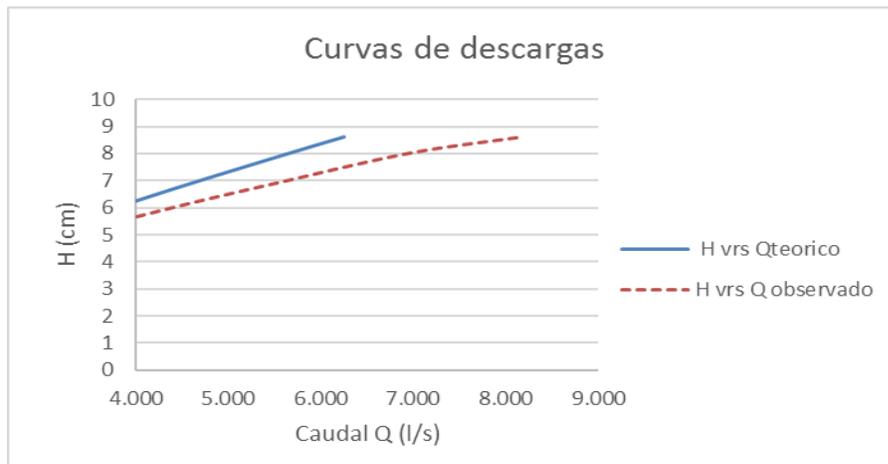
Tabla XI. **Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 15,2**

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
2,50	1,069	1,218
3,10	1,464	1,876
3,90	2,044	2,429
5,10	3,005	3,408
6,10	3,875	4,520
6,90	4,609	5,522
8,00	5,662	6,958
8,60	6,255	8,184

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XI, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y del caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 60. **Curvas de descargas de V.R. de solera de 15,2**

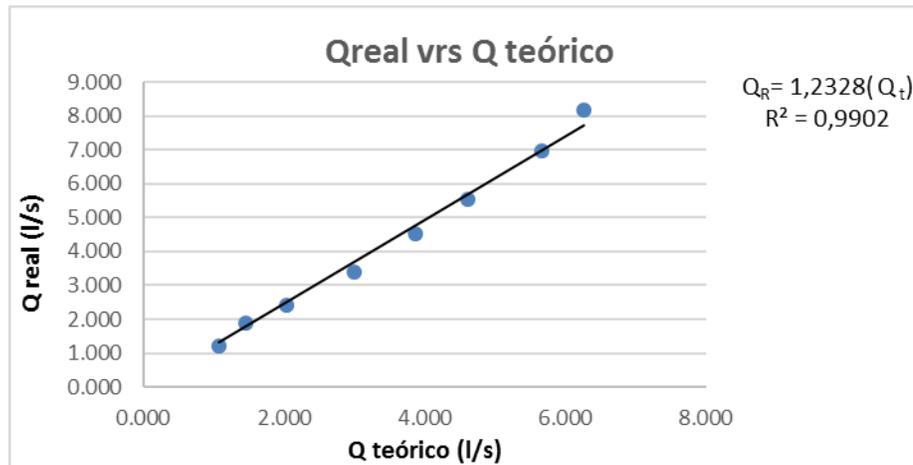


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 61. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 15,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 15,2 cm, el cual es de:

$$C_d = 1,2328$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{cal} = 1,2328 * 0,0184 * (15,2 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

$$Q_{cal} = 0,0226 * (15,2 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

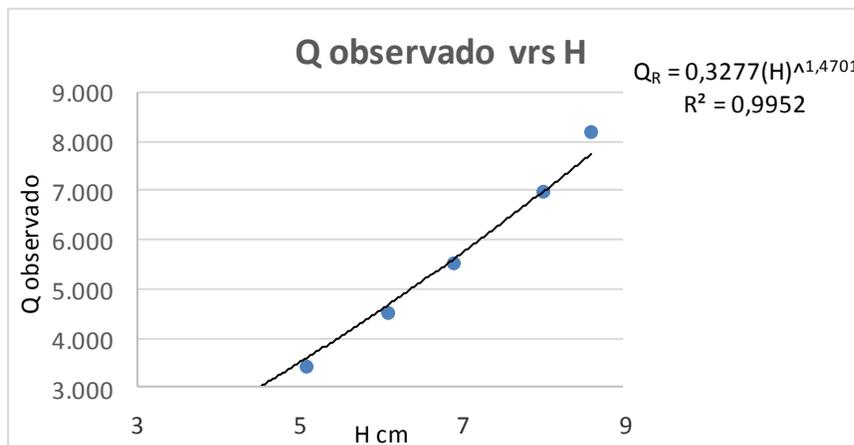
Donde:

$$Q_{cal} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Como se mencionó anteriormente, para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 62. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solare de 15,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,3277H^{1,4701}$$

Donde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado, que se muestra en la siguiente tabla XII.

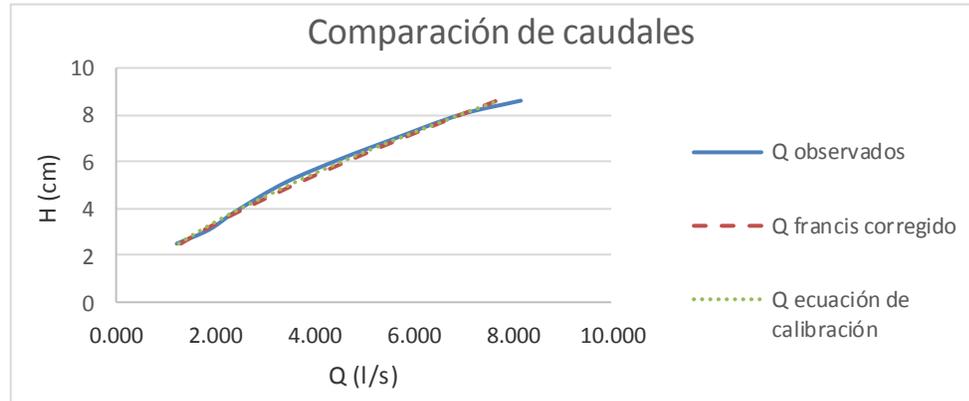
Tabla XII. **Comparación de caudales de V.R. de salera de 15,2**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
2,50	1,218	1,318	8,183	1,260	3,444
3,10	1,876	1,805	3,769	1,729	7,821
3,90	2,429	2,519	3,727	2,423	0,225
5,10	3,408	3,705	8,718	3,595	5,496
6,10	4,520	4,778	5,701	4,677	3,480
6,90	5,522	5,682	2,903	5,606	1,532
8,00	6,958	6,980	0,330	6,968	0,151
8,60	8,184	7,712	5,767	7,750	5,303

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XII.

Figura 63. **Comparación de caudales**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.6. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 20 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestran en la tabla XIII se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XIII. **Datos obtenidos en ensayo de V.R. de solera de 20**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,90	54,09	159,3	63,53	189,12	84,44	244,13
4,50	32,18	124,06	48,25	181,48	55,37	207,88
5,20	27,50	129,58	41,06	191,20	52,75	244,13
6,00	20,75	122,68	27,60	161,38	22,22	130,27
6,60	19,50	135,79	23,53	162,07	21,07	144,78
7,50	16,94	143,39	20,22	170,39	22,22	187,04
8,10	19,56	187,73	21,19	203,02	23,56	224,60
9,00	15,10	167,62	16,12	178,71	19,63	216,93

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo de cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma.

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

$$V = \text{litros}$$

$$t = \text{segundos}$$

Tabla XIV. **Caudales observados de V.R. de solera de 20**

H (cm)	Q _{r1} (l/s)	Q _{r2} (l/s)	Q _{r3} (l/s)	< Q _{obs} > (l/s)
3,90	2,945	2,977	2,891	2,938
4,50	3,855	3,761	3,754	3,790
5,20	4,712	4,657	4,628	4,666
6,00	5,912	5,847	5,863	5,874
6,60	6,964	6,888	6,871	6,908
7,50	8,465	8,427	8,418	8,436
8,10	9,598	9,581	9,533	9,571
9,00	11,101	11,086	11,051	11,079

Fuente: elaboración propia.

Según el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

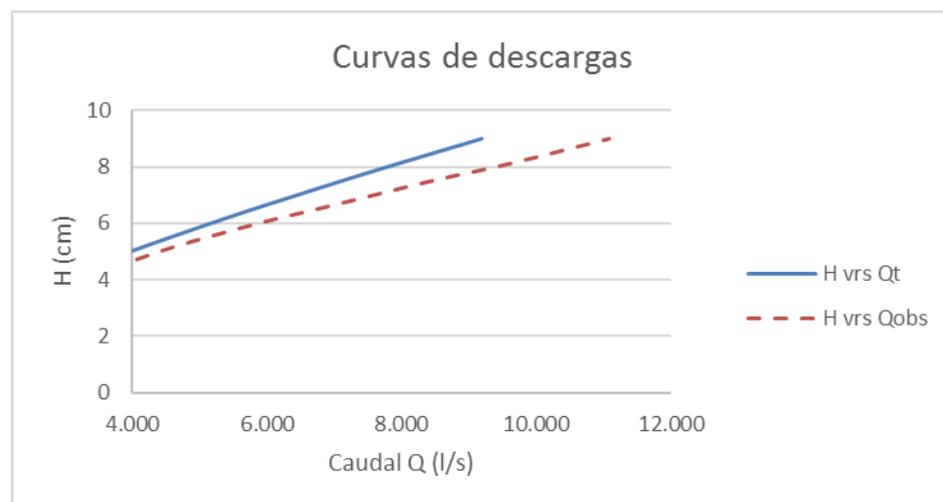
Tabla XV. **Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 20**

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
3,90	2,766	2,938
4,50	3,408	3,790
5,20	4,202	4,666
6,00	5,165	5,874
6,60	5,921	6,908
7,50	7,105	8,436
8,10	7,924	9,571
9,00	9,191	11,079

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XV, se plantean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H, en la siguiente gráfica.

Figura 64. **Curvas de descargas de V.R de solera de 20**

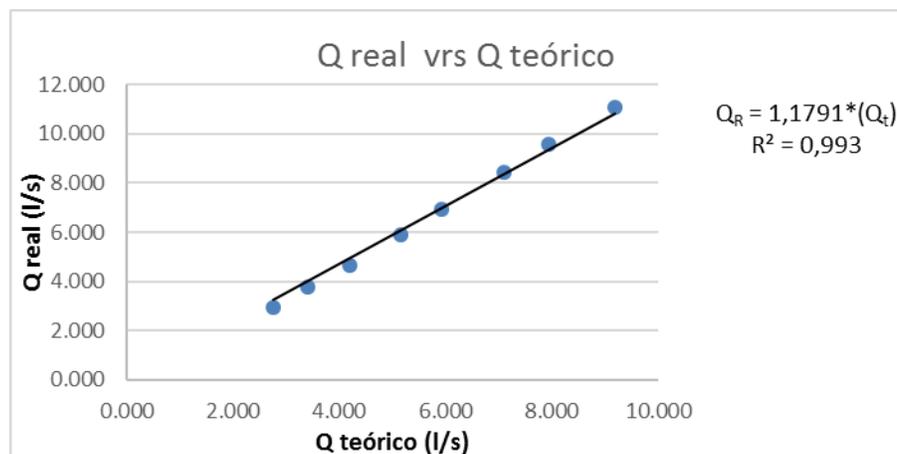


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 65. **Determinación del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 20**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 20 cm, el cual es de:

$$Cd = 1,1791$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{rsal} = 1,791 * 0,0184 * (20 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

$$Q_{rsal} = 0,03295 * (20 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

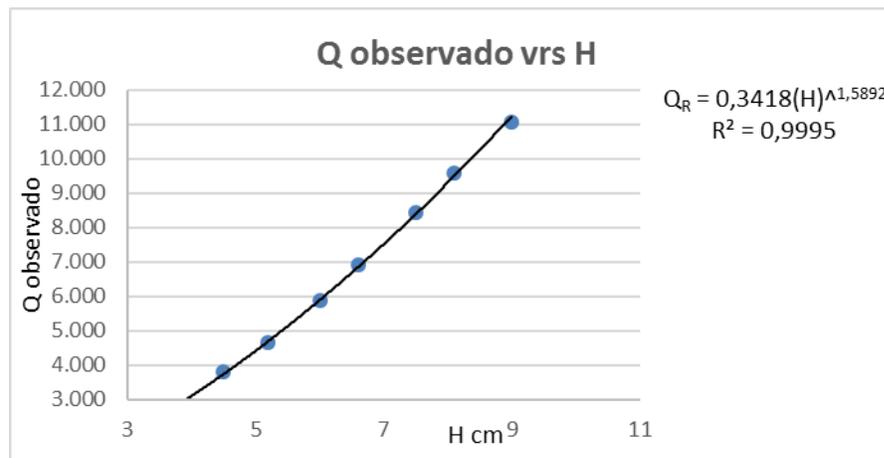
Donde:

$$Q_{rsal} = l/s$$

$$H = \text{cm}$$

Como se mencionó, anteriormente, para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 66. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 20**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión, se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_t = 0,3418H^{1,5892}$$

Donde:

$$Q_t = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado, que se muestra en la tabla XV.

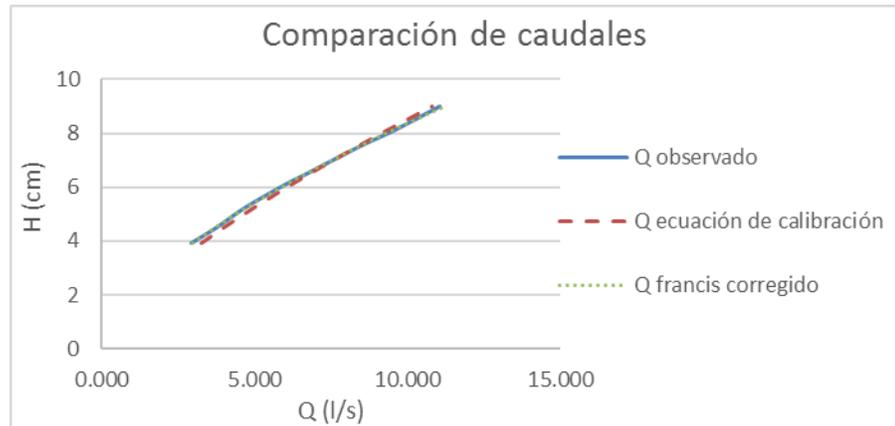
Tabla XVI. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 20**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
3,90	2,938	3,62	11,029	2,972	1,177
4,50	3,790	4,018	6,003	3,731	1,556
5,20	4,666	4,955	6,201	4,695	0,633
6,00	5,874	6,090	3,679	5,894	0,340
6,60	6,908	6,982	1,077	6,858	0,719
7,50	8,436	8,378	0,697	8,403	0,399
8,10	9,571	9,343	2,381	9,496	0,780
9,00	11,079	10,837	2,188	11,227	1,331

Fuente: elaboración propia.

Se presenta el siguiente gráfico que compara los caudales obtenidos en la tabla XVI.

Figura 67. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 20**



Fuente: elaboración propia empleando programas Excel.

3.2.7. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 35 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestra en la tabla XVII, se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XVII. **Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 35**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,80	49,13	254,54	49,20	254,54	4903	253,43
4,60	36,81	259,00	37,50	262,35	36,60	253,42
5,40	29,12	259,00	29,87	261,23	30,00	259,00
6,30	24,62	266,87	23,59	250,07	25,16	272,39
7,10	21,32	270,15	21,53	270,15	22,78	285,77
7,90	17,25	262,35	17,31	263,46	17,97	271,27
8,90	14,34	259,00	14,25	256,77	14,47	260,11

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{ob} = l/s$$

V= litros

t = segundos

Tabla XVIII. **Caudal observado de V.R. de solera de 35**

H (cm)	Q _{r1} (l/s)	Q _{r2} (l/s)	Q _{r3} (l/s)	< Q _{obs} > (l/s)
3,80	5,181	5,174	5,169	5,174
4,60	7,036	6,996	6,924	6,985
5,40	8,894	8,746	8,633	8,758
6,30	10,837	10,601	10,826	10,755
7,10	12,672	12,548	12,545	12,588
7,90	15,209	15,220	15,096	15,175
8,90	18,062	18,019	17,976	18,019

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

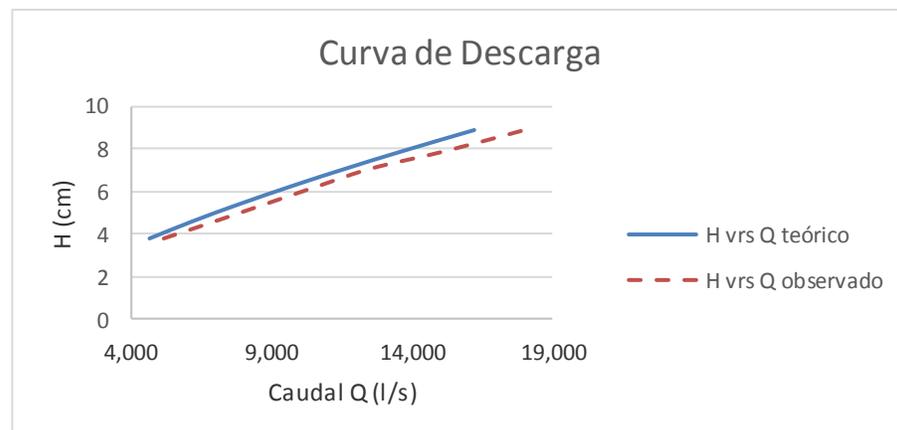
Tabla XIX. **Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 35**

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
3,80	4,667	5,174
4,60	6,187	6,985
5,40	7,832	8,758
6,30	9,817	10,755
7,10	11,689	12,588
7,90	13,654	15,175
8,90	16,229	18,019

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla III, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 68. **Curvas de descargas de V.R. de solera de 35**

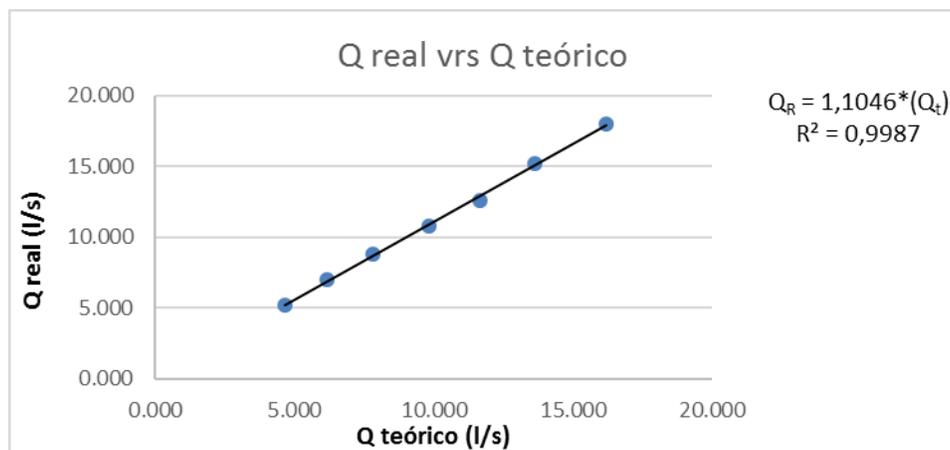


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 69. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 35**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 10 (cm), el cual es de:

$$Cd = 1,1046$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,1046 * 0,0184 * (35 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

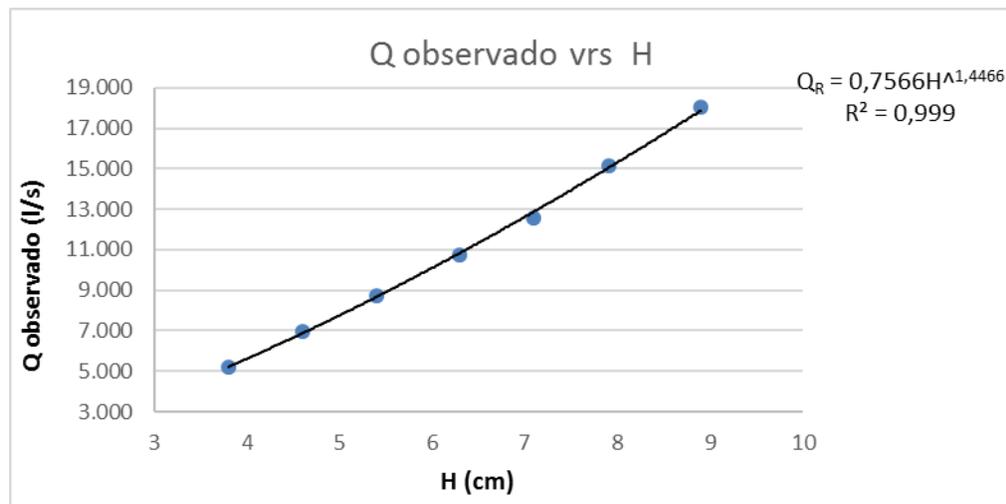
$$Q_{real} = 0,02032 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = \text{l/s}$

$H = \text{cm}$

Como se mencionó anteriormente para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 70. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera 35**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,7566H^{1,4466}$$

Donde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado que se muestra en la tabla XX.

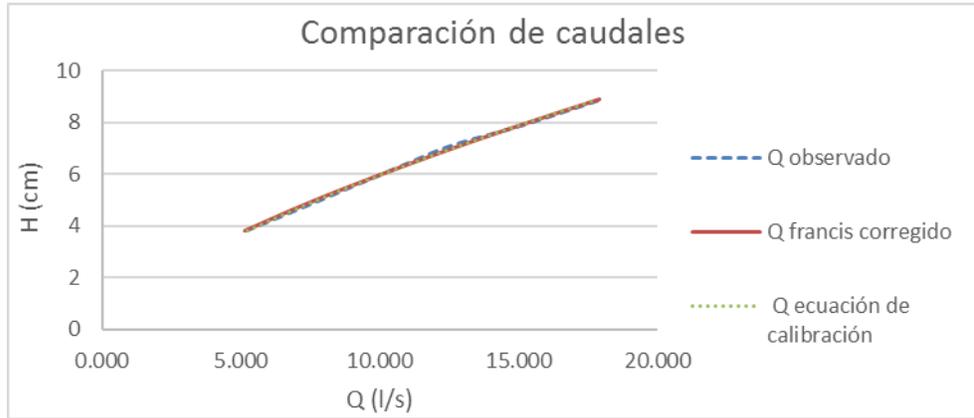
Tabla XX. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 35**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
3,00	1,381	1,431	2,745	1,117	0,005
3,50	1,650	1,730	3,603	1,389	0,560
4,00	1,985	2,042	4,861	1,678	1,694
4,50	2,374	2,365	2,856	1,981	0,187
5,00	2,609	2,698	0,380	2,299	3,150
5,50	4,667	4,614	3,426	2,630	0,838
8,20	5,781	5,723	1,140	4,624	0,910
9,70	1,381	1,431	1,004	5,863	1,420

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XX.

Figura 71. **Comparación de caudales de V.R de solera de 35**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.8. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 40 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestra en la tabla XXI se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XXI. **Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 40**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,90	51,13	211,03	55,50	229,00	59,60	247,85
3,90	36,81	224,42	37,31	237,81	38,40	241,15
4,40	32,09	224,42	33,25	250,08	35,09	254,54
5,90	21,32	225,53	21,94	233,34	22,28	235,57
6,50	19,00	237,81	20,22	251,19	20,18	269,04
7,20	16,90	252,31	20,34	296,93	20,75	309,21
7,8 0	13,12	213,26	14,53	240,04	15,25	251,19

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

V= litros

t = segundos

Tabla XXII. **Caudal observado de V.R. de solera de 40**

H (cm)	Q _{r1} (l/s)	Q _{r2} (l/s)	Q _{r3} (l/s)	< Q _{obs} > (l/s)
2,90	4,127	4,126	4,159	4,137
3,90	6,369	6,374	6,280	6,341
4,40	6,993	7,521	7,254	7,256
5,90	10,579	10,636	10,573	10,596
6,50	12,516	12,423	12,703	12,547
7,20	14,930	14,598	14,902	14,810
7,80	16,255	16,520	16,472	16,416

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

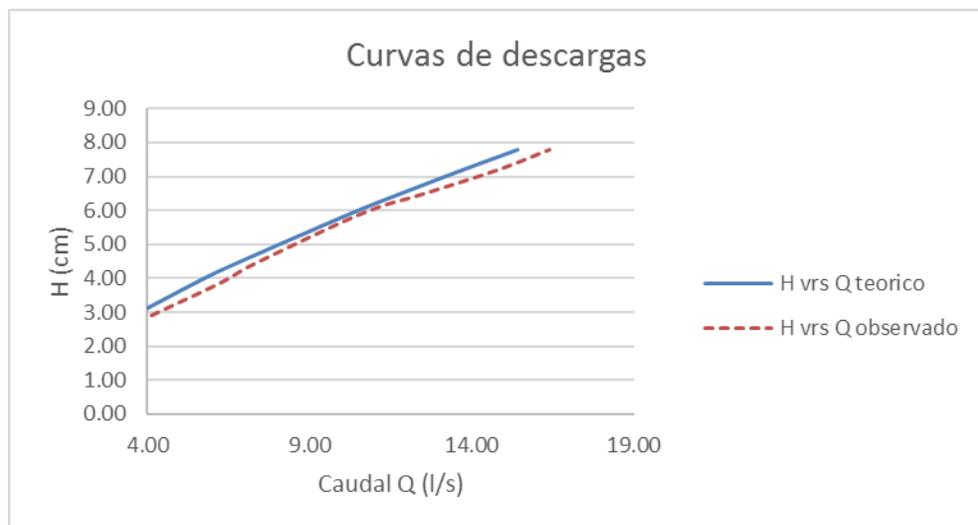
Tabla XXIII. Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 40

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
2,90	3,58	4,137
3,90	5,56	6,341
4,40	6,64	7,256
5,90	10,24	10,596
6,50	11,80	12,547
7,20	13,71	14,810
7,80	15,40	16,416

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XXIII, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 72. Curvas de descargas de V.R. de solera de 40

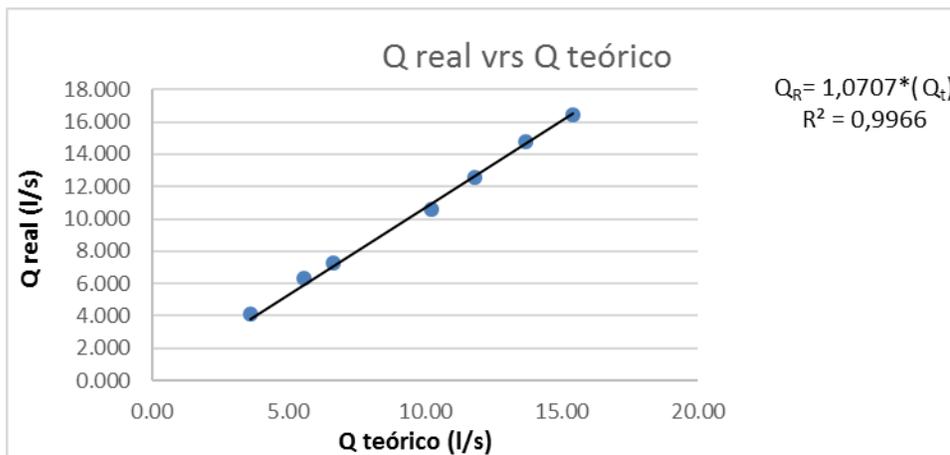


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 73. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 40**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 10 cm, el cual es de.

$$Cd = 1,0707$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,0707 * 0,0184 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

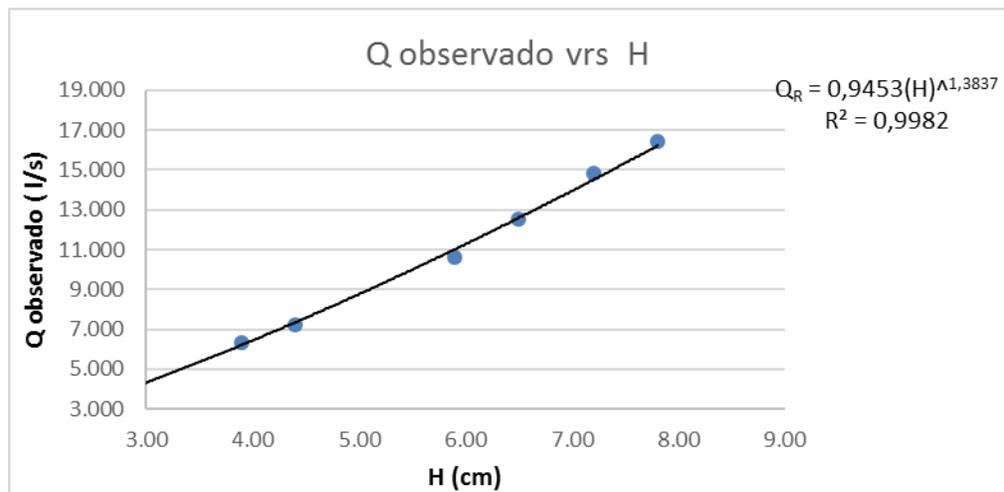
$$Q_{real} = 0,0197 * (40 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = \text{l/s}$

$H = \text{cm}$

Como se menciona, anteriormente, para obtener la ecuación experimental, se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación en la siguiente gráfica.

Figura 74. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 40**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,9453H^{1,3837}$$

Donde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado que se muestra en la siguiente tabla XXIV.

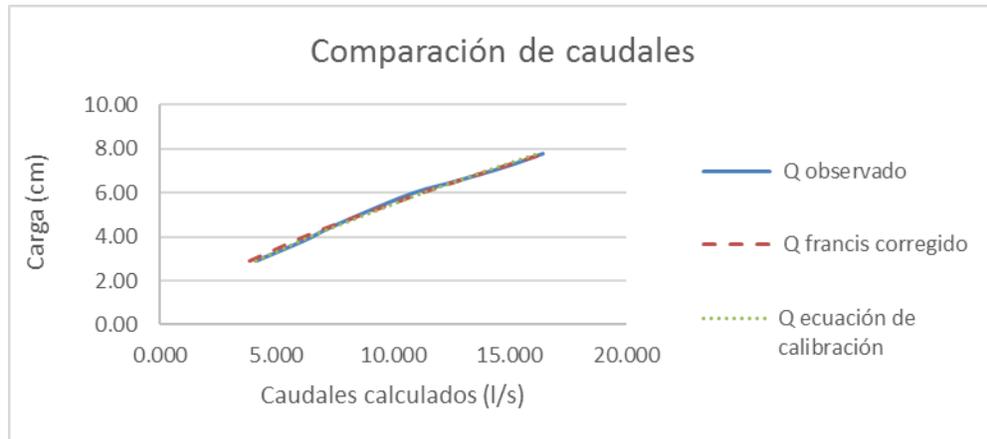
Tabla XXIV. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 40**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
2,90	4,137	3,835	7,300	4,125	0,306
3,90	6,341	5,951	6,152	6,215	1,992
4,40	7,256	7,113	1,970	7,344	1,207
5,90	10,596	10,960	3,439	11,020	4,007
6,50	12,547	12,635	0,697	12,601	0,426
7,20	14,810	14,676	0,901	14,516	1,981
7,80	16,416	16,497	0,498	16,217	1,211

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XXIV.

Figura 75. **Comparación de caudales de V.R de solera de 40**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.9. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 45 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestran en la tabla XXV se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XXV. **Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 45**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,20	53,19	271,28	50,79	246,73	43,03	235,57
3,90	38,91	254,54	36,20	238,92	46,31	299,17
4,80	26,93	243,38	27,50	253,42	27,78	254,54
5,30	23,35	252,31	29,10	266,81	24,97	266,81
5,80	23,03	269,04	22,09	259,00	20,75	254,54
6,50	16,15	246,73	18,73	253,42	22,97	303,63
6,80	15,69	257,88	18,06	284,66	15,25	242,26

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

$$V = \text{litros}$$

$$t = \text{segundos}$$

Tabla XXVI. **Caudal observado de V.R. de solera de 45**

H (cm)	Q _{r1} (l/s)	Q _{r2} (l/s)	Q _{r3} (l/s)	< Q _{obs} > (l/s)
3,20	5,100	4,858	5,475	5,144
3,90	6,542	6,600	6,460	6,534
4,80	9,038	9,215	9,163	9,139
5,30	10,806	10,741	10,685	10,744
5,80	11,682	11,725	12,267	11,891
6,50	15,277	13,530	13,219	14,009
6,80	15,601	15,394	15,886	15,627

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

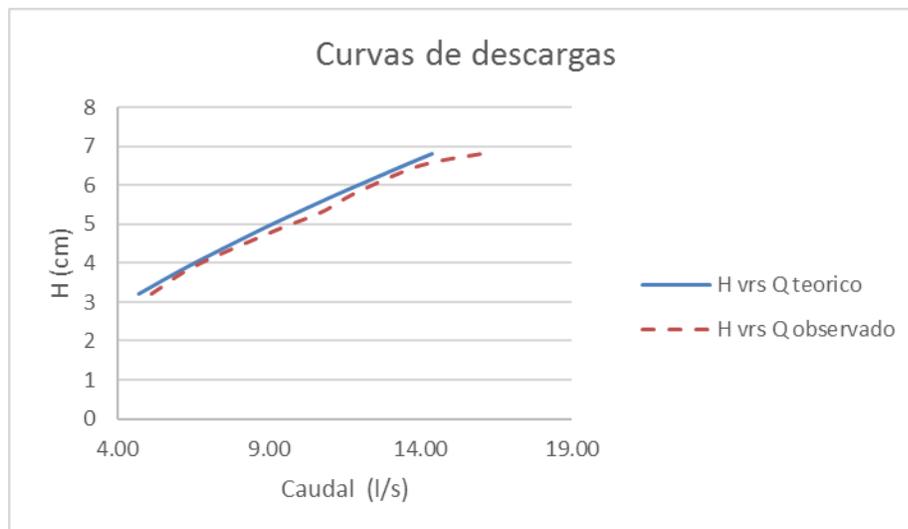
Tabla XXVII. **Caudal teórico y real observado de V.R.**

H (cm)	Q_{teórico} (l/s)	Q_{observado} (l/s)
3,20	4,73	5,14
3,90	6,34	6,53
4,80	8,62	9,14
5,30	9,98	10,74
5,80	11,40	11,89
6,50	13,48	14,01
6,80	14,40	16,03

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XI, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 76. **Curvas de descargas de V.R. de solera de 45**

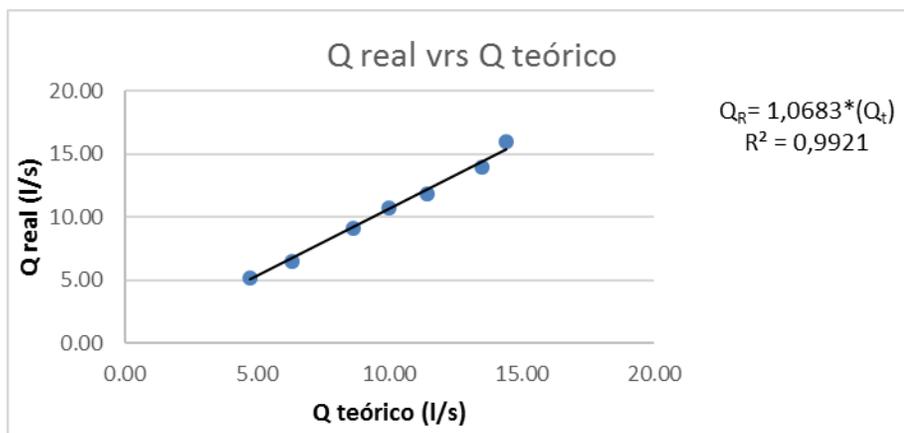


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 77. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R. de solera de 45**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 45 cm, el cual es de:

$$Cd = 1,0683$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,0689 * 0,0184 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

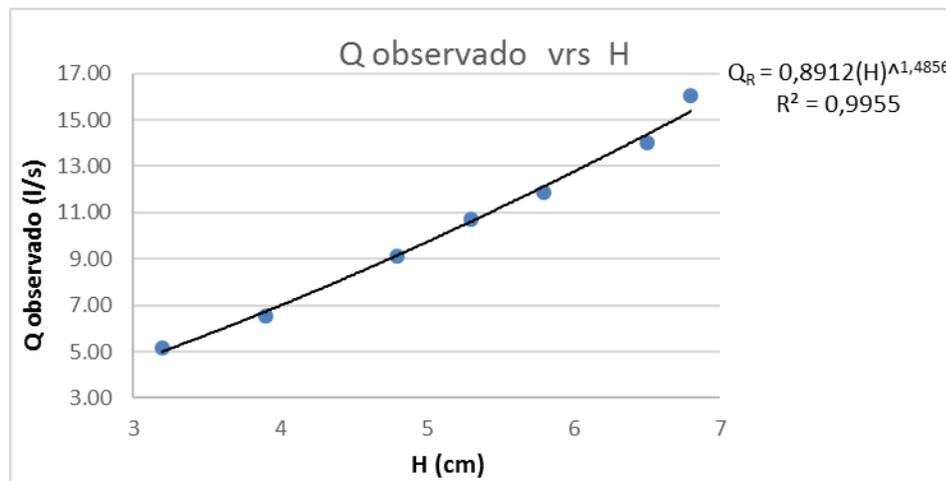
$$Q_{real} = 0,0196 * (10 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = \text{l/s}$

$H = \text{cm}$

Como se mencionó anteriormente, para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación en la siguiente gráfica.

Figura 78. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 45**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,7229 * H^{1,5309}$$

Donde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales, y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado que se muestra en la tabla XXVIII.

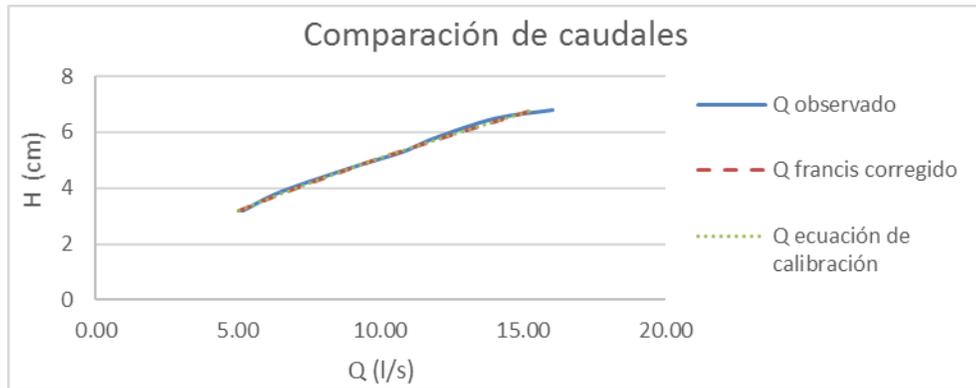
Tabla XXVIII. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 45**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
3,20	5,14	5,048	1,876	5,017	2,48
3,90	6,53	6,770	3,617	6,731	3,01
4,80	9,14	9,207	0,750	9,163	0,26
5,30	10,74	10,659	0,794	10,616	1,19
5,80	11,89	12,174	2,380	12,137	2,07
6,50	14,01	14,398	2,779	14,376	2,62
6,80	16,03	15,385	4,012	15,373	4,09

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XXVII.

Figura 79. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 45**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.10. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 50 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestran en la tabla XXIX se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XXIX. **Datos obtenidos de los ensayos de V.R. de solera de 50**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,50	37,12	228,37	39,33	241,15	41,71	253,42
4,00	28,89	223,30	30,42	236,69	32,67	252,31
4,70	23,58	228,37	25,83	250,08	27,49	270,16
5,20	20,70	229,48	22,68	251,19	20,70	229,48
5,70	18,67	234,46	20,70	259,00	22,74	281,94
6,20	16,15	228,37	18,73	266,81	20,83	298,05
6,80	13,77	226,65	16,06	264,58	18,67	306,98

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

$$V = \text{litros}$$

$$t = \text{segundos}$$

Tabla XXX. **Caudal observado de V.R. de solera de 50**

H (cm)	Q_{r1} (l/s)	Q_{r2} (l/s)	Q_{r3} (l/s)	$\langle Q_{obs} \rangle$ (l/s)
3,50	6,152	6,132	6,076	6,120
4,00	7,729	7,781	7,723	7,744
4,70	9,685	9,682	9,828	9,731
5,20	11,086	11,076	11,086	11,081
5,70	12,558	12,512	12,398	12,490
6,20	14,140	14,245	14,309	14,231
6,80	16,460	16,475	16,442	16,459

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

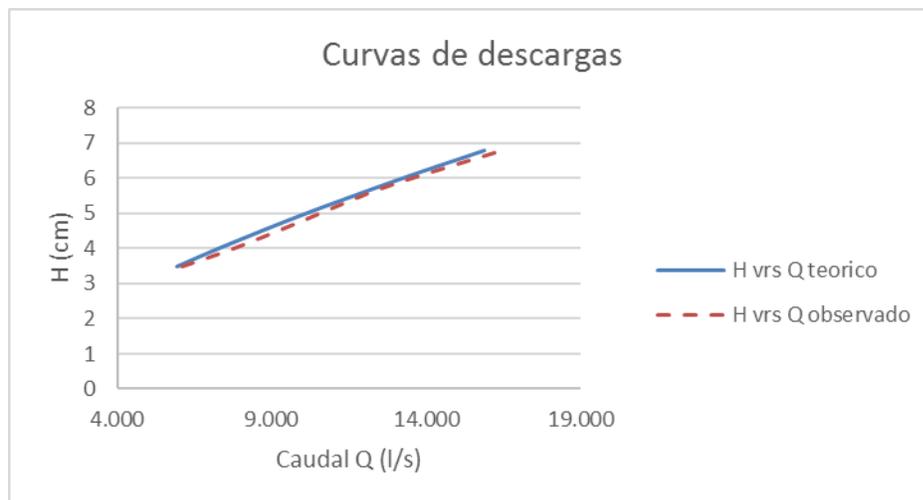
Tabla XXXI. Caudal teórico y real observados de V.R. de solera de 50

H (cm)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{observado}$ (l/s)
3,50	5,940	6,12
4,00	7,242	7,74
4,70	9,198	9,73
5,20	10,682	11,08
5,70	12,234	12,49
6,20	13,851	14,23
6,80	15,870	16,46

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XXXI, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 80. Curvas de descargas de V.R. de solera de 50

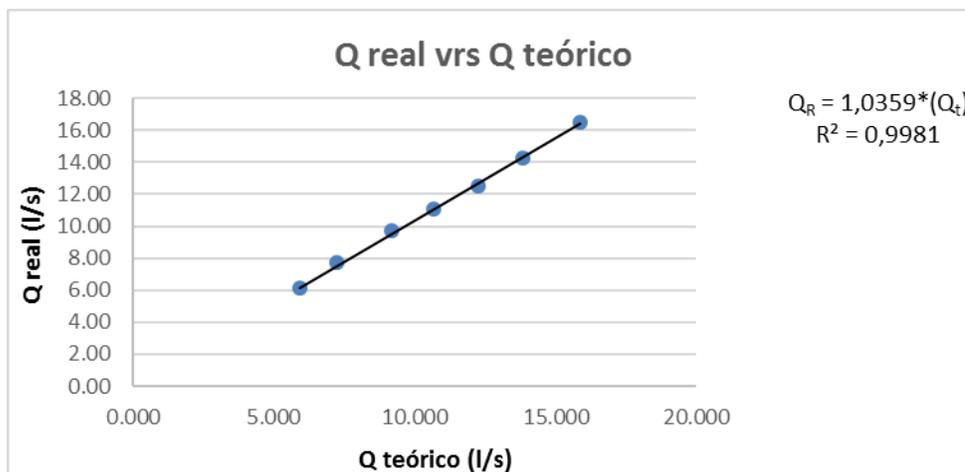


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 81. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 50**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 50 cm, el cual es de.

$$C_d = 1,0359$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,0359 * 0,0184 * (50 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

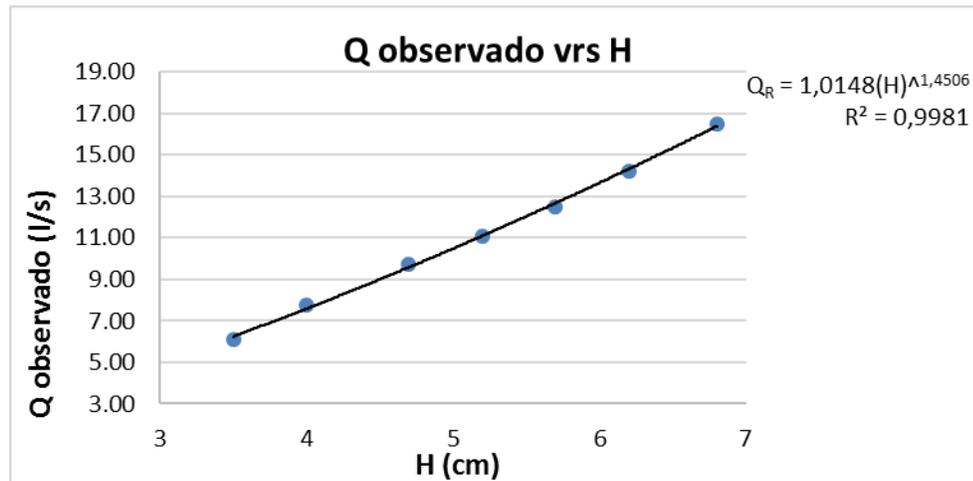
$$Q_{real} = 0,0190 * (50 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = \text{l/s}$

$$H = \text{cm}$$

Como se mencionó, anteriormente para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 82. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 50**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 1,0148 H^{1.4506}$$

Dónde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado que se muestra en la tabla XXXII.

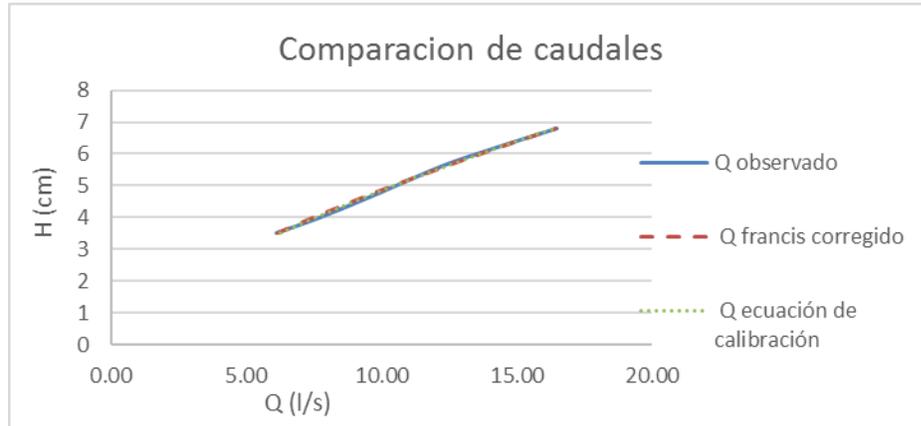
Tabla XXXII. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 50**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
3,50	6,12	6,153	0,541	6,246	2,062
4,00	7,74	7,502	3,127	7,581	2,109
4,70	9,73	9,528	2,088	9,579	1,564
5,20	11,08	11,066	0,136	11,092	0,102
5,70	12,49	12,674	1,474	12,672	1,462
6,20	14,23	14,348	0,818	14,316	0,595
6,80	16,46	16,440	0,116	16,369	0,547

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XXXII.

Figura 83. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 50**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.2.11. **Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones con ancho de solera de 55 cm**

Con los datos obtenidos en el ensayo que se muestran en la tabla XXXIII se procede a realizar los cálculos de caudal real observado y caudal teórico.

Tabla XXXIII. **Datos obtenidos en los ensayos de V.R. de solera de 55**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,80	47,84	231,11	58,65	262,35	37,97	159,71
3,30	34,88	208,80	40,34	244,50	45,31	272,39
3,80	33,84	246,73	36,38	265,70	40,31	295,82
4,40	27,58	263,46	28,38	271,28	30,38	294,70
5,00	20,87	243,38	24,06	264,58	25,97	314,79
5,50	17,00	225,53	20,75	275,74	23,94	314,79
6,10	18,37	290,24	14,78	233,34	17,66	275,74

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo para cada uno de los tirantes, se procede a calcular los caudales reales observados de la siguiente forma:

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

Donde:

$$Q_{obs} = l/s$$

V= litros

t = segundos

Tabla XXXIV. **Caudal observado de V.R. de solera de 55**

H (cm)	Q_{r1} (l/s)	Q_{r2} (l/s)	Q_{r3} (l/s)	$\langle Q_{obs} \rangle$ (l/s)
2,80	4,831	4,473	4,206	4,503
3,30	5,986	6,061	6,032	6,026
3,80	7,291	7,303	7,339	7,311
4,40	9,552	9,559	9,701	9,604
5,00	11,662	10,997	11,606	11,421
5,50	13,267	13,289	13,149	13,235
6,10	15,800	15,788	15,614	15,734

Fuente: elaboración propia.

Según en el inciso 2.3, la ecuación de Francis es utilizada para encontrar el caudal teórico en un vertedero rectangular con dos contracciones, siendo esta:

$$Q_t = 1,84 * (b - (0,1 * n * H))H^{3/2}$$

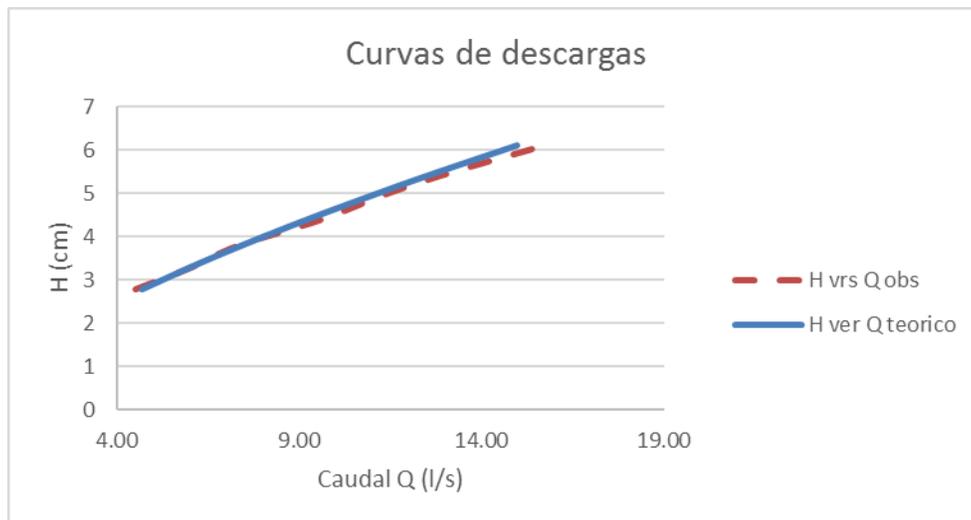
Tabla XXXV. **Caudal teórico y real observado de V.R. de solera de 55**

H (cm)	Q _{teórico} (l/s)	Q _{observado} (l/s)
2,80	4,71	4,50
3,30	6,02	6,03
3,80	7,42	7,31
4,40	9,22	9,60
5,00	11,15	11,42
5,50	12,84	13,23
6,10	14,96	15,73

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del caudal real observado y teórico que se presentan en la tabla XXXV, se plotean las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función del tirante H en la siguiente gráfica.

Figura 84. **Curvas de descargas de V.R. de solera de 55**

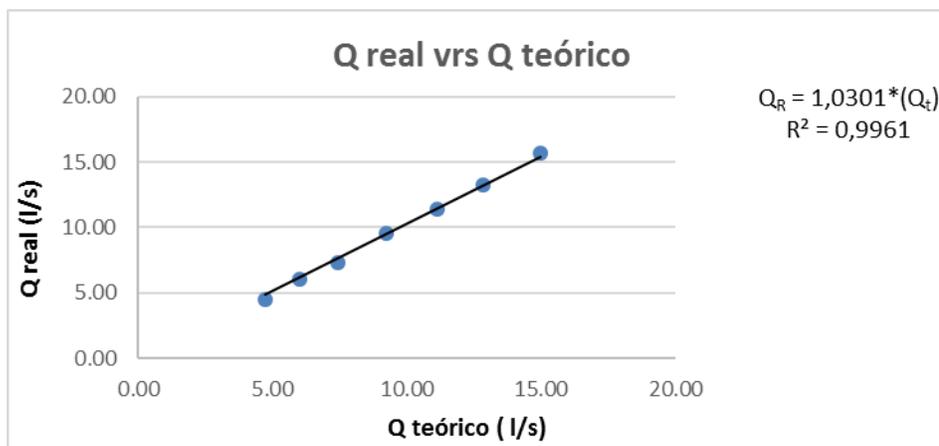


Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Al observar la gráfica de las curvas de descarga, donde se comparan los caudales observados con los caudales teóricos, se observa que hay una diferencia entre Q_{real} y $Q_{teórico}$. Sin embargo, al relacionar dichos caudales se observa que existe una relación directamente proporcional entre ambos. Se tiene que la correlación de la gráfica es lineal; y con la pendiente de recta en la gráfica se representa el coeficiente de descarga, con el Q_{real} observado, se determina el Q_{real} , el cual queda de la siguiente manera:

$$Q_{real} = Cd * Q_t$$

Figura 85. **Obtención del coeficiente de descarga de V.R de solera de 55**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Por lo que se llega a obtener el coeficiente de descarga para el vertedero rectangular de dos contracciones con un ancho de solera de 55 cm, el cual es de:

$$Cd = 1,0301$$

Queda la ecuación corregida de la siguiente manera:

$$Q_{real} = 1,0301 * 0,0184 * (55 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Operando:

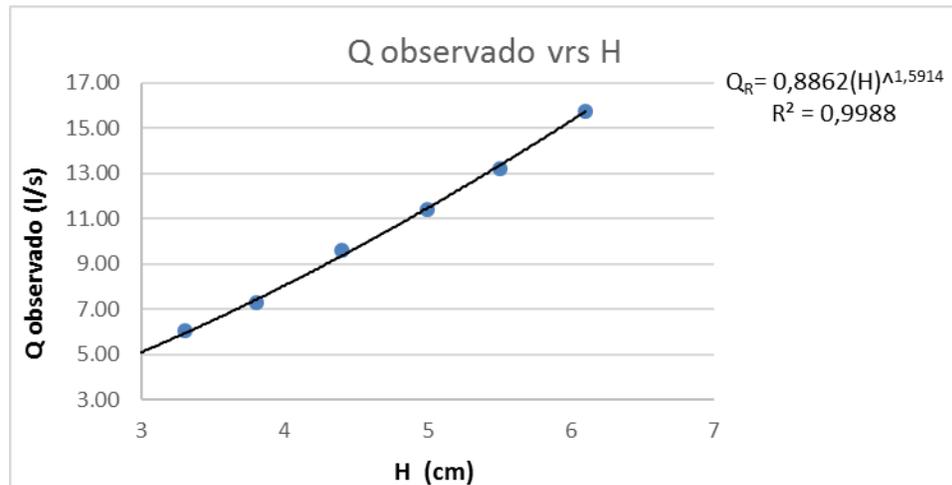
$$Q_{real} = 0,0189 * (55 - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}}$$

Donde: $Q_{real} = \text{l/s}$

$H = \text{cm}$

Como se mencionó, anteriormente, para obtener la ecuación experimental se requiere el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación que se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 86. **Obtención de la ecuación experimental de V.R. de solera de 55**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el resultado de la regresión se obtiene la siguiente ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,8862H^{1,5914}$$

Donde:

$$Q_{real} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

Con la ecuación de calibración y la ecuación experimental, se procede a calcular los caudales; y con los resultados obtenidos se realiza una comparación con respecto al caudal real observado que se muestra en la tabla XXXVI.

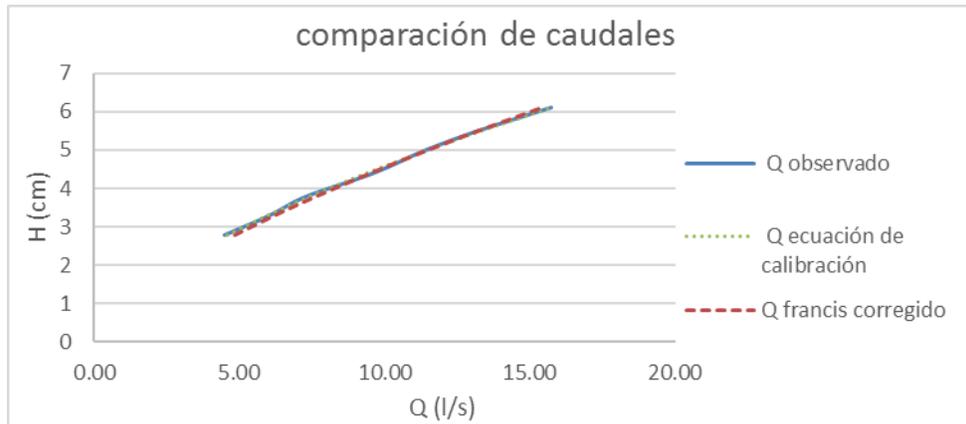
Tabla XXXVI. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 55**

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
2,50	1,218	1,318	8,183	1,260	3,444
3,10	1,876	1,805	3,769	1,729	7,821
3,90	2,429	2,519	3,727	2,423	0,225
5,10	3,408	3,705	8,718	3,595	5,496
6,10	4,520	4,778	5,701	4,677	3,480
6,90	5,522	5,682	2,903	5,606	1,532
8,00	6,958	6,980	0,330	6,968	0,151
8,60	8,184	7,712	5,767	7,750	5,303

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XXXVI.

Figura 87. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 55**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.3. Obtención del modelo matemático basado en la ecuación de Francis utilizando el programa SPSS y Cd en función de la base para vertederos rectangulares con dos contracciones y ancho variado

3.3.1. Obtención del modelo matemático con SPSS

SPSS es un programa estadístico informático empleado hoy en día por las empresas para realizar investigaciones de diversa índole. Originalmente SPSS fue creado como el acrónimo de *Statistical Package for the Social Sciences* aunque también se ha referido como *Statistical Product and Service Solutions*. Sin embargo, en la actualidad la parte SPSS del nombre completo del software (IBM SPSS) no es acrónimo de nada.

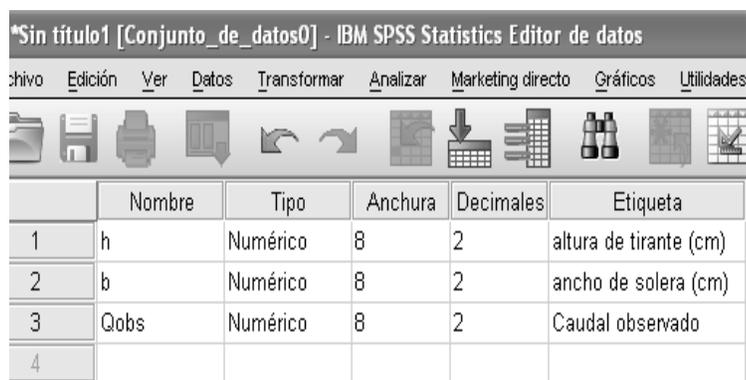
Con el software de analítica predictiva SPSS se podrán obtener nuevos modelos matemáticos. Esto para que se puedan tomar decisiones más inteligentes, resolver problemas y mejorar los resultados. Cabe destacar que SPSS es uno de los programas estadísticos más conocidos. Teniendo en cuenta su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y un sencillo interface para la mayoría de los análisis.

Con el programa se obtiene un modelo matemático partiendo de la observación del Cd, no es constante para ninguno de los vertederos ensayados. Dicho programa permite relacionar las distintas bases de los vertederos rectangulares, la altura de carga y el caudal observado obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio y genera un modelo matemático que puede ser empleado para cualquier ancho de base.

3.3.1.1. Asignación de datos

La asignación de datos en el programa consiste en establecer el nombre de cada uno ellos como se ilustra en la figura 88.

Figura 88. Formato de datos



The image shows a screenshot of the IBM SPSS Statistics Editor de datos window. The title bar reads '*Sin título1 [Conjunto_de_datos0] - IBM SPSS Statistics Editor de datos'. The menu bar includes Archivo, Edición, Ver, Datos, Transformar, Analizar, Marketing directo, Gráficos, and Utilidades. Below the menu bar is a toolbar with various icons. The main area displays a table with the following data:

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta
1	h	Numérico	8	2	altura de tirante (cm)
2	b	Numérico	8	2	ancho de solera (cm)
3	Qobs	Numérico	8	2	Caudal observado
4					

Fuente: elaboración propia empleando programa SPSS 19.

3.3.1.2. Ingreso de datos

Se ingresa en el programa los datos obtenidos de los ensayos de cada vertedero, como se ilustra en la figura 89.

Figura 89. Ingreso de datos

	h	b	Qobs
1	2,50	6,20	,43
2	3,30	6,20	,63
3	4,30	6,20	,97
4	5,40	6,20	1,36
5	6,60	6,20	1,90
6	7,80	6,20	2,43
7	9,70	6,20	3,44
8	11,10	6,20	4,04
9	3,00	10,00	1,12
10	3,50	10,00	1,38
11	4,00	10,00	1,65
12	4,50	10,00	1,99
13	5,00	10,00	2,37
14	5,50	10,00	2,61
15	8,20	10,00	4,67
16	9,70	10,00	5,78
17	2,50	15,20	1,22
18	3,10	15,20	1,88
19	3,90	15,20	2,43
20	5,10	15,20	3,41
21	6,10	15,20	4,52
22	6,90	15,20	5,52
23	8,00	15,20	6,96
24	8,60	15,20	8,18

Fuente: elaboración propia empleando programa SPSS 19.

Con los datos ingresados en el programa se procede a definir la ecuación de la siguiente forma:

$$= k * (b - 0,1 * (2 * H)) * H^n$$

Donde

Q = caudal en litros por segundo

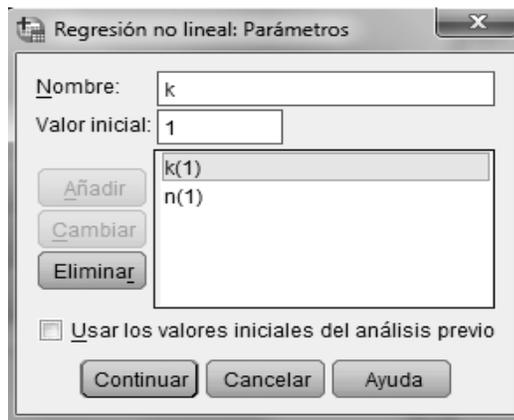
b = base en centímetros

h = altura observada en centímetros

K, n = valores a determinar con SPSS

Al momento de integrar la ecuación en el programa, se deben definir los parámetros a determinar, datos independientes y dependientes, para definir la ecuación; como se ilustra en las figuras 90 al 92.

Figura 90. **Asignación de parámetro**



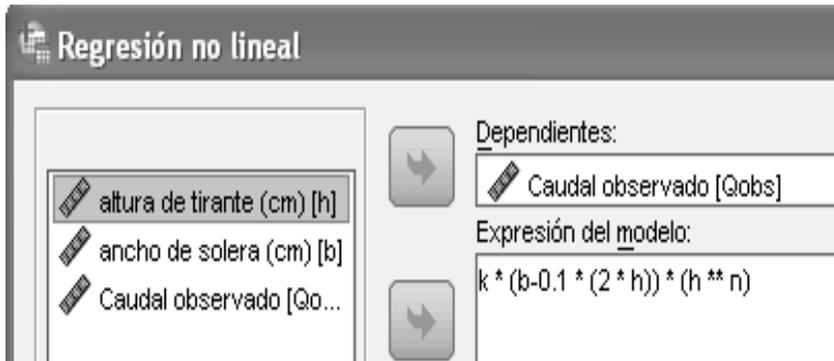
Fuente: elaboración propia empleando programas SPSS 19.

Figura 91. **Datos dependientes**



Fuente: elaboración propia empleando programas SPSS 19.

Figura 92. **Definiendo ecuación**



Fuente: elaboración propia empleando programa SPSS 19.

Tabla XXXVII. **Estimación de los parámetros**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
k1	0,016	0,001	0,015	0,018
k2	1,613	0,027	1,559	1,667

Fuente: elaboración propia empleando programa SPSS 19.

Según las observaciones en los cálculos anteriores se demuestra que los coeficientes de descargas son diferentes para cada vertedero. Con el programa estadístico (SPSS) se analizan y se estiman los parámetros para el modelo matemático propuesto, para la ecuación de Francis; con lo que se obtiene así un coeficiente de descarga constante para diferentes anchos de soleras de vertederos. Bajo estos conceptos se presenta la siguiente ecuación:

$$Q_{real} = 0,016 * (b - 0,2H) * (H^{1,613})$$

3.3.2. Obtención del modelo matemático con Cd en función de la base

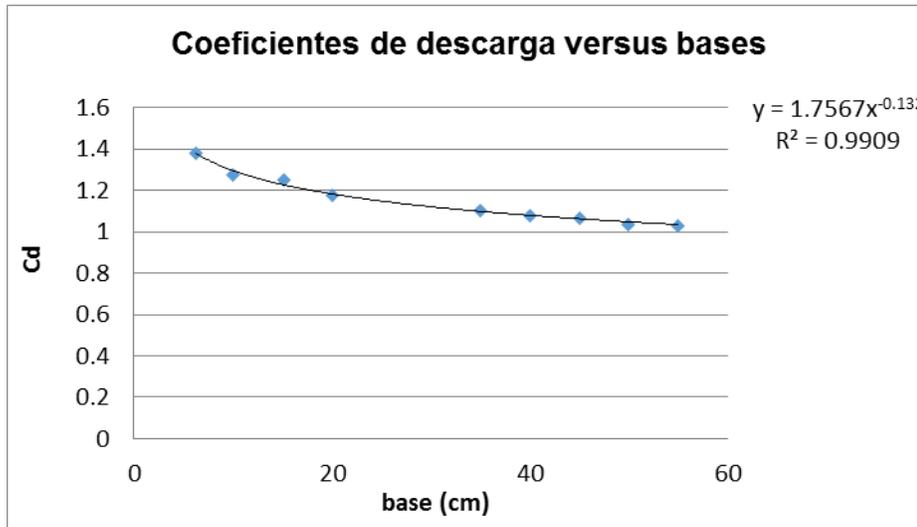
El modelo de coeficiente de descarga se obtiene mediante el coeficiente de cada vertedero independiente. Con estos datos se procede a proponer otro coeficiente generalizado para todos los anchos de soleras de vertederos. Para lograrlo se debe realizar una gráfica en el programa de Excel de todos los coeficientes en función de la base de cada vertedero. Los pasos a seguir para la obtención del coeficiente en función de la base son los siguientes:

Tabla XXXVIII. Datos de b y Cd de cada V.R.

b (cm)	Cd
6,20	1,380
10,00	1,277
15,20	1,250
20,00	1,179
35,00	1,104
40,00	1,080
45,00	1,068
50,00	1,037
55,00	1,030

Fuente: elaboración propia.

Figura 93. Obtención del Cd en función de la base



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

Según el comportamiento de la gráfica, se tiende a un modelo potencial de exponente negativo; por lo que se propone un modelo matemático para el coeficiente de descarga generalizado en función de la base para cada vertedero. El modelo matemático para el Cd se presenta en la siguiente ecuación:

$$Cd = 1,7567 * (b)^{-0.132}$$

Al realizar la sustitución del Cd en la ecuación de Francis, esta queda de la siguiente forma:

$$Q_{real} = (1,7567 * (b)^{-0.132}) * (0,0184 * (b - (0,2 * H)) * H^{\frac{3}{2}})$$

3.4. Calibraciones de V.R. con el modelo SPSS y Cd en función de la base

3.4.1. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 6,2 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los siguientes ejemplos.

Con el modelo matemático SPSS se tiene lo siguiente.

$$Q_{real} = 0,016 * (6,2 - 0,2 * 2,5) * (2,5^{1,613}) = 0.4 \text{ l/s}$$

Con % de error de:

$$\% \text{ error} = \left(\frac{0,429 - 0,4}{0,429} \right) * 100 = 6,728$$

Con el modelo matemático Cd en función de la base se tiene lo siguiente.

$$Q_{real} = (1,7567 * (6,2)^{-0,132}) * \left(0,0184 * (6,2 - (0,2 * 2,5)) * 25^{\frac{3}{2}} \right) = 0.572 \text{ l/s}$$

Con % de error de:

$$\% \text{ error} = \left(\frac{0,429 - 0,572}{0,429} \right) * 100 = 33,531$$

Los otros resultados de los caudales se muestran en la tabla XXXIX.

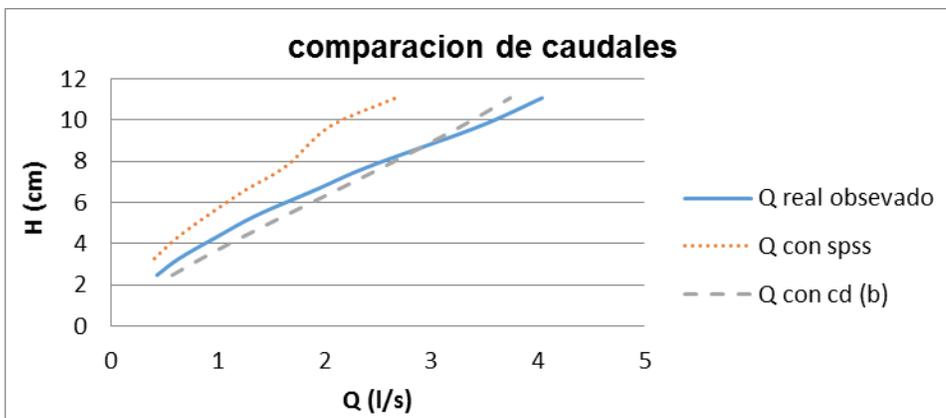
Tabla XXXIX. **Comparación de caudales obtenidos con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 6,2**

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
2,50	0,429	0,400	6,728	0,572	33,531
3,30	0,633	0,608	3,973	0,844	33,229
4,30	0,970	0,898	7,402	1,210	24,687
5,40	1,360	1,244	8,541	1,632	20,023
6,60	1,898	1,639	13,676	2,102	10,745
7,80	2,430	2,040	16,055	2,568	5,679
9,70	3,440	2,662	22,629	3,270	4,968
11,10	4,042	3,091	23,529	3,739	7,493

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XXXIX

Figura 94. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 6,2**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.2. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 10 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la siguiente tabla XL.

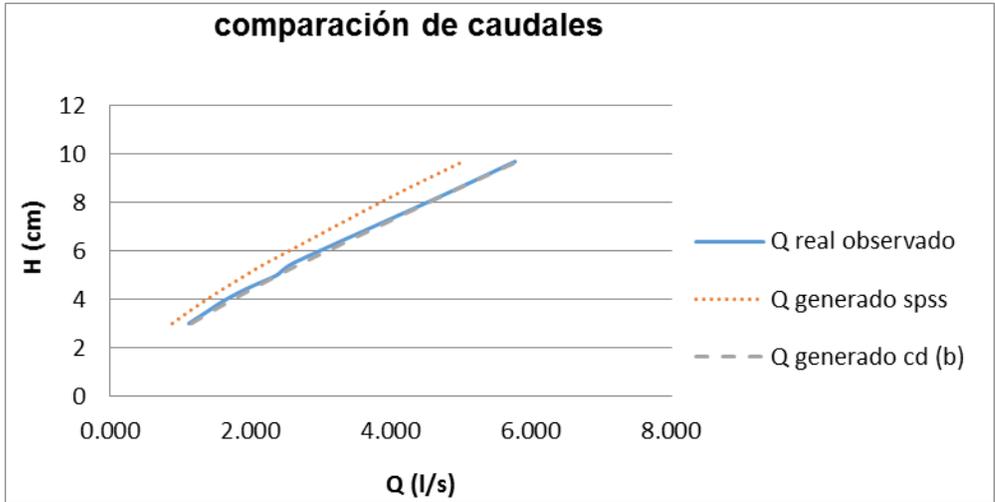
Tabla XL. **Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 10**

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
3,00	1,117	0,885	20,807	1,165	4,272
3,50	1,381	1,122	18,743	1,452	5,143
4,00	1,650	1,377	16,505	1,755	6,420
4,50	1,985	1,647	17,005	2,072	4,384
5,00	2,374	1,931	18,654	2,400	1,100
5,50	2,609	2,227	14,630	2,738	4,963
8,20	4,667	3,984	14,634	4,682	0,328
9,70	5,781	5,036	12,878	5,808	0,466

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLI.

Figura 95. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 10**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.3. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 15,2 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLI.

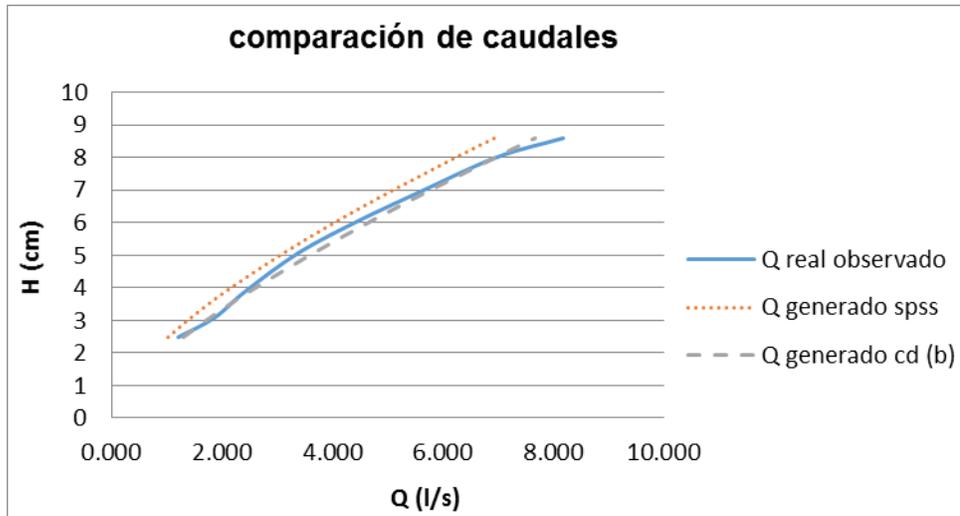
Tabla XLI. **Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R de solera de 15,2**

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
2,50	1,218	1,031	15,368	1,311	7,636
3,10	1,876	1,447	22,866	1,796	4,255
3,90	2,429	2,072	14,672	2,507	3,203
5,10	3,408	3,141	7,814	3,686	8,169
6,10	4,520	4,134	8,540	4,754	5,167
6,90	5,522	4,985	9,713	5,653	2,383
8,00	6,958	6,228	10,486	6,945	0,177
8,60	8,184	6,937	15,236	7,673	6,243

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLI.

Figura 96. Comparación de caudales de V.R. de solera de 15,2



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.4. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 20 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLII.

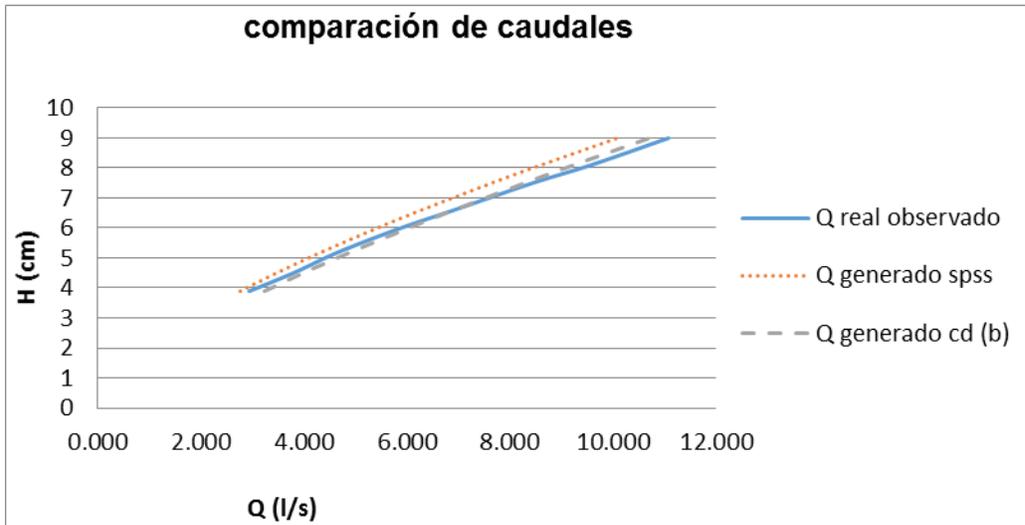
Tabla XLII. Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 20

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
3,90	2,938	2,762	5,973	3,222	9,678
4,50	3,790	3,458	8,775	3,969	4,704
5,20	4,666	4,334	7,110	4,894	4,887
6,00	5,874	5,413	7,849	6,014	2,383
6,60	6,908	6,272	9,198	6,894	0,197
7,50	8,436	7,634	9,508	8,271	1,963
8,10	9,571	8,587	10,275	9,223	3,636
9,00	11,079	10,078	9,035	10,696	3,461

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLII.

Figura 97. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 20**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.5. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 35 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLIII.

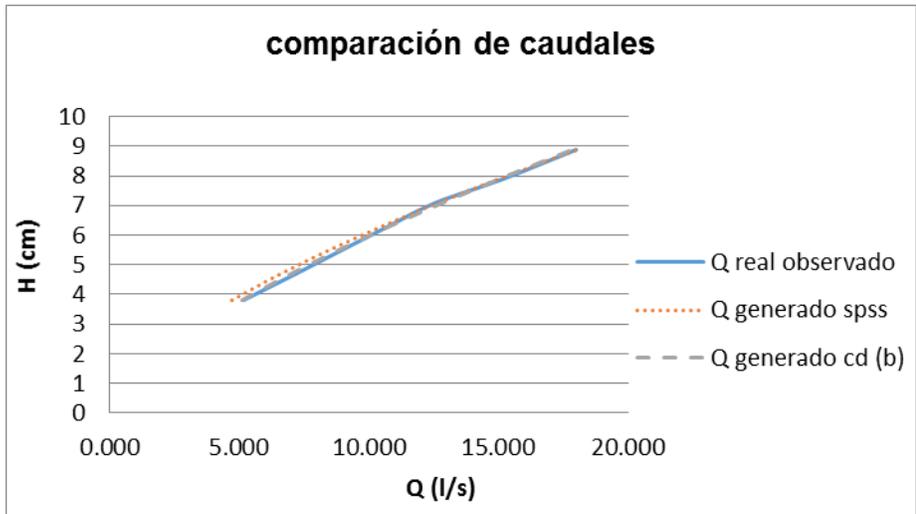
Tabla XLIII. Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de solera de 35

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
3,80	5,174	4,719	8,803	5,128	0,907
4,60	6,985	6,392	8,493	6,797	2,694
5,40	8,758	8,240	5,913	8,605	1,746
6,30	10,755	10,510	2,277	10,786	0,288
7,10	12,588	12,685	0,766	12,843	2,024
7,90	15,175	14,997	1,174	15,002	1,141
8,90	18,019	18,067	0,266	17,831	1,042

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLIII.

Figura 98. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 35**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.6. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 40 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLIV.

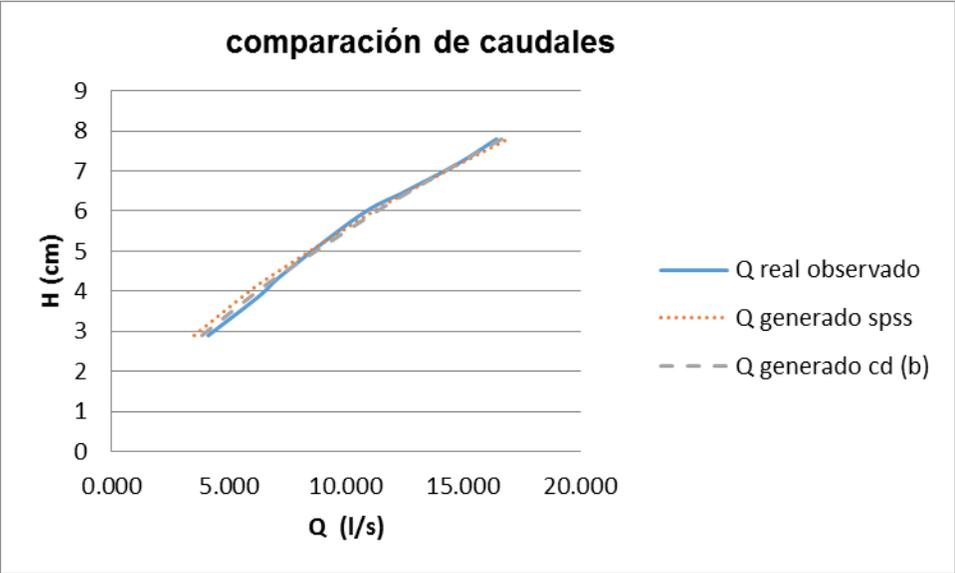
Tabla XLIV. **Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de solera de 40**

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
2,90	4,137	3,513	15,089	3,867	6,537
3,90	6,341	5,637	11,110	6,000	5,380
4,40	7,256	6,830	5,876	7,172	1,164
5,90	10,596	10,878	2,666	11,050	4,290
6,50	12,547	12,678	1,044	12,739	1,525
7,20	14,810	14,898	0,597	14,797	0,085
7,80	16,416	16,899	2,943	16,633	1,325

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLIV.

Figura 99. Comparación de caudales de V.R. de solera de 40



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.7. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 45 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLV.

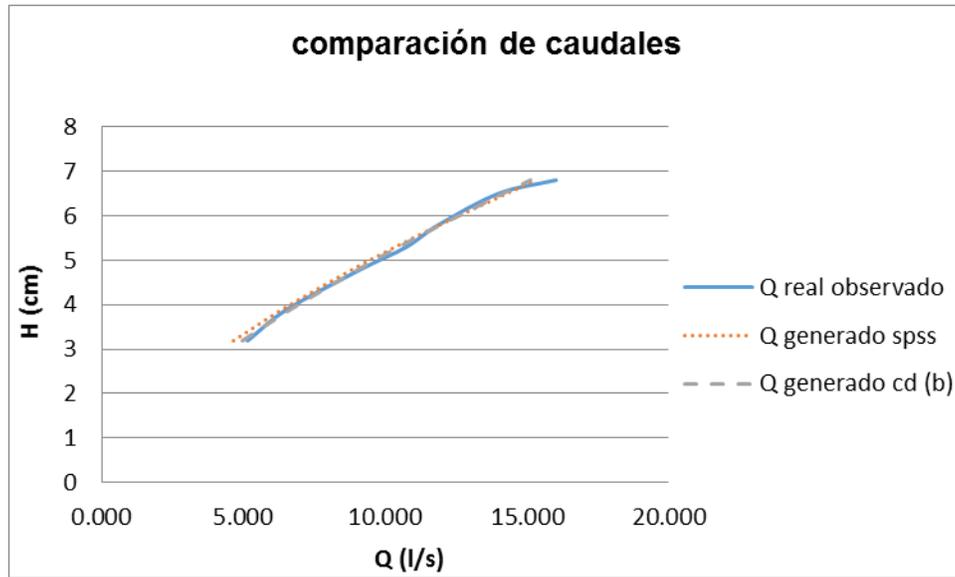
Tabla XLV. **Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 45**

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
3,20	5,144	4,634	9,926	4,966	3,464
3,90	6,534	6,355	2,737	6,661	1,937
4,80	9,139	8,847	3,188	9,057	0,889
5,30	10,744	10,357	3,600	10,485	2,410
5,80	11,891	11,951	0,500	11,976	0,709
6,50	14,009	14,316	2,195	14,163	1,098
6,80	16,028	15,376	4,070	15,134	5,583

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLV.

Figura 100. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 45**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.8. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 50 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLV.

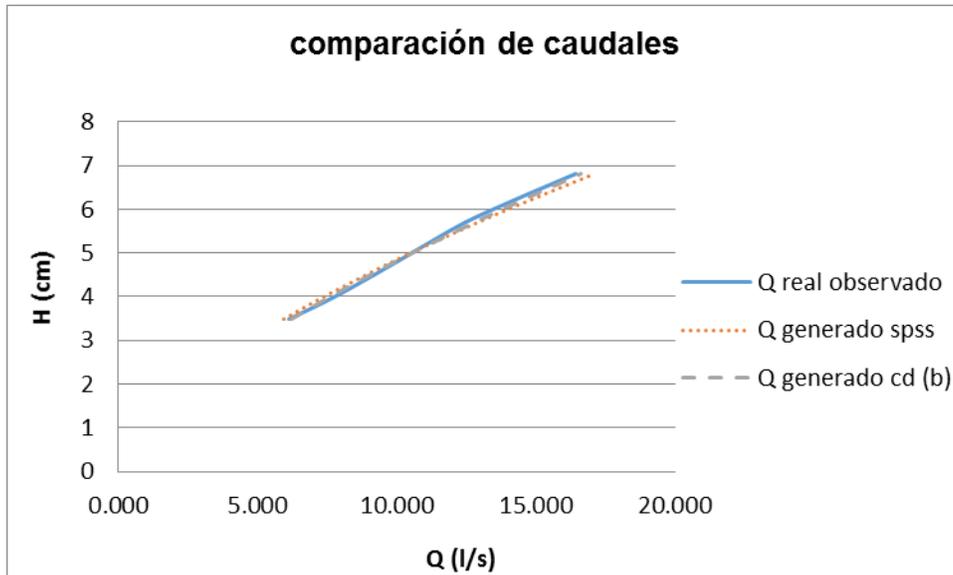
Tabla XLVI. Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 50

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
3,50	6,120	5,950	2,768	6,226	1,732
4,00	7,744	7,366	4,891	7,591	1,979
4,70	9,731	9,527	2,103	9,641	0,928
5,20	11,081	11,191	0,995	11,197	1,047
5,70	12,490	12,951	3,694	12,824	2,676
6,20	14,231	14,802	4,007	14,518	2,012
6,80	16,459	17,138	4,124	16,634	1,067

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLVI.

Figura 101. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 50**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

3.4.9. Calibración de V.R. con SPSS y Cd en función de la base para un ancho de solera de 55 cm

Con base en la ecuación propuesta con el software SPSS y Cd en función de la base, se muestran los resultados de los caudales en la tabla XLV.

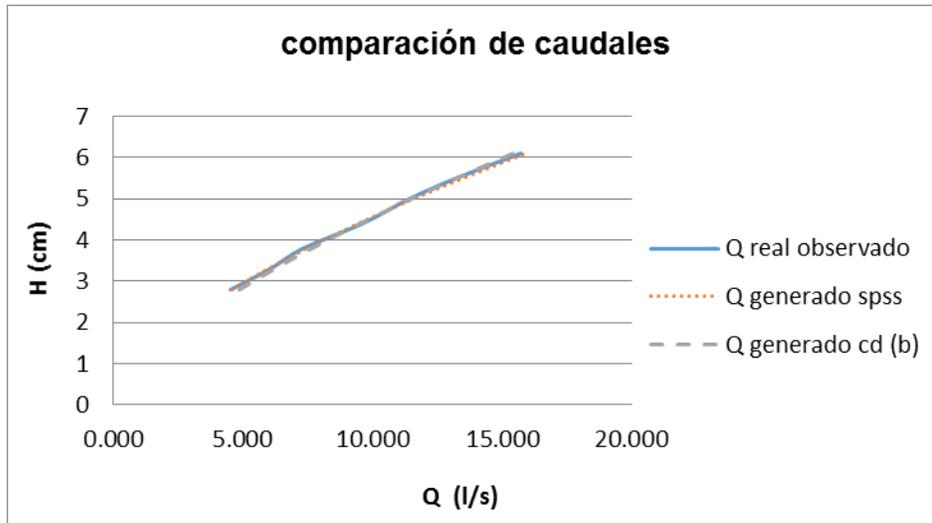
Tabla XLVII. Comparación de caudales obtenido con SPSS y Cd en función de la base de V.R. de solera de 55

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q generado con SPSS (l/s)	Error (%)	Q generado con Cd (l/s)	Error (%)
2,80	4,503	4,585	1,803	4,858	7,870
3,30	6,026	5,965	1,019	6,204	2,950
3,80	7,311	7,475	2,247	7,652	4,666
4,40	9,604	9,449	1,617	9,513	0,945
5,00	11,421	11,587	1,445	11,498	0,674
5,50	13,235	13,487	1,906	13,241	0,047
6,1	15,734	15,903	1,076	15,431	1,922

Fuente: elaboración propia.

Se presenta la siguiente gráfica de comparación de caudales obtenidos de la tabla XLVII.

Figura 102. **Comparación de caudales de V.R. de solera de 55**



Fuente: elaboración propia empleando programa Excel.

CONCLUSIONES

1. Se diseñaron y fabricaron nueve vertederos rectangulares con dos contracciones tomando en cuenta la precisión en corte de acuerdo a las especificaciones del diseño.
2. Se realizaron los ensayos necesarios de carga sobre el vertedero y aforo volumétrico, para los diferentes anchos de soleras, con los cuales se obtuvieron los coeficientes de descarga para cada vertedero.
3. El coeficiente de descarga C_d no es constante en ninguno de los vertederos ensayados debido a la variación de su ancho de solera; por lo que se recurrió al software estadístico SPSS para deducir un modelo matemático que relaciona la descarga con el ancho de solera y el tirante H . Con dicho modelo se obtuvo un porcentaje de error promedio de 5 % entre el caudal real observado con anchos de soleras mayor de 35 cm, los anchos de soleras menores a 35 cm se obtuvo un porcentaje de error promedio de 13 %.
4. Al analizar el comportamiento del coeficiente de descarga, se observa que tiende a disminuir cuando se aumenta el ancho de solera; por lo que se determinó un modelo matemático experimental con la ayuda del programa de Excel que relaciona el C_d con el ancho de solera. Dicho modelo tuvo muy buena correlación como muestra la figura 93.

5. Al relacionar el modelo matemático obtenido del coeficiente de descarga en función del ancho de solera con la ecuación Francis, se obtuvo otro modelo que permitió disminuir el porcentaje de error entre el caudal observado y el calculado. Se mantuvo el exponente de la carga $3/2$. Los porcentajes de error obtenidos con este modelo son menores con el porcentaje de error obtenido con el programa SPSS tal como se muestra en las tablas de la XLIII a la XLVII.
6. Al comparar los caudales reales observados con los modelos obtenidos con el *software* SPSS y el modelo del coeficiente de descarga en función de la base, se observa que el porcentaje de error con el segundo modelo es menor; también, el porcentaje de error en los dos modelos se reduce conforme el ancho de solera aumenta según se observa en las figuras de la 94 a la 102.
7. Los vertederos rectangulares de dos contracciones se utilizan para medir caudales grandes, debido a que se necesita de una carga mayor para que el flujo salga en trayectoria parabólica; además, entre más grande sea el ancho de solera, más precisos serán los caudales generados en los modelos, tal como muestran las comparaciones de los gráficos de las figuras de la 98 a la 102, donde se observa, que, a mayor ancho, menor porcentaje de error.

RECOMENDACIONES

1. Al emplear los vertederos rectangulares con dos contracciones se deben seguir las especificaciones de diseño de estas estructuras, verificar detalladamente las dimensiones de los mismos, el bisel, y el material del que va a estar construido para evitar la corrosión o cualquier otro daño que afecte a la estructura.
2. Es necesario considerar el bisel de la lámina vertiente que juega un papel importante en los vertederos. Esto debido a que no permite que el flujo se deslice sobre la cara exterior de estos; disminuyendo de esta forma el efecto de la viscosidad sobre la pared misma del vertedero.
3. Al tomar las lecturas de carga de altura (H), se debe esperar que el flujo y el tirante de agua se estabilicen y se puedan obtener lecturas precisas y satisfactorias del caudal que circula por el canal del laboratorio. El periodo de tiempo para la estabilización del flujo dependerá de la dimensión de la base del vertedero rectangular y las condiciones del canal donde se estén llevando a cabo los ensayos.
4. Considerar que la carga de altura (H) debe ser tomada a una distancia mayor o igual a cuatro veces la máxima altura (H), medida a partir de la ubicación del vertedero hacia aguas arriba del mismo.

5. Si van a emplearse vertederos rectangulares con base menores a 35 cm se recomienda utilizar la ecuación experimental $Q = KH^n$ propia de cada vertedero, ya que presentó un menor porcentaje de error entre el caudal obtenido y el observado.
6. Se deben tener todos los cuidados necesarios para el adecuado funcionamiento hidráulico de los vertederos rectangulares con dos contracciones. Por ejemplo, la altura mínima para aplicar los modelos propuestos debe ser mayor a 3,8 cm para el ancho mayor a 35 cm, En caso de que el ancho este entre el rango de 10 cm a 35 cm, se debe usar el modelo de coeficiente de descarga en función de la base a una altura mínima de 3 cm; además, se debe observar que tenga una caída libre el flujo, y que entre el flujo y el vertedero exista ventilación a presión atmosférica. Debe verificarse que la velocidad de aproximación sea la menor posible en el canal o cauce donde se requiera instalar alguno de los vertederos ensayados en el laboratorio.
7. Debido a la limitación de los ensayos de vertederos en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, se recomienda emplear los modelos matemáticos deducidos en esta investigación desde vertederos de base de 6,2 cm a 55 cm. Se deja abierta la propuesta para que se realicen ensayos para vertederos de 60 cm en adelante donde se puedan validar los modelos matemáticos determinados.

BIBLIOGRAFÍA

1. AZEVEDO, J. M. y Guillermo Acosta A. *Manual de hidráulica*. 6ª ed. Mexico: Harla, 1976. 578 p.
2. GÓMEZ MEDRANO, Michael Arturo. *Calibración de vertederos de pared gruesa*. Trabajo de graduación de ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 123 p.
3. GILES, Ronald V. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. México: M^c Graw Hill, 1969. 273 p.
4. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidor de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
5. PORTILLO ESPAÑA, Luis Eduardo. *Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 155 p.
6. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. Mexico: Limusa, 1997. 267 p.
7. VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidráulica de canales*. Cartago: Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 p.

