



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

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED  
DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA**

**Alexis Fernando García Vásquez**

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, julio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED  
DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ALEXIS FERNANDO GARCÍA VÁSQUEZ**

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, JULIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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 TRIANGULARES DE PARED DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de mayo de 2014.



**Alexis Fernando García Vásquez**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 18 de Mayo de 2015

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director de Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Alexis Fernando García Vásquez, quien se identifica con carné No. 2000-11376, titulado CALIBRACION DE VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA, 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

**LUIS M. SANDOVAL MENDOZA**  
**INGENIERO CIVIL**  
**COLEGIADO 6496**





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
4 de mayo de 2015

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

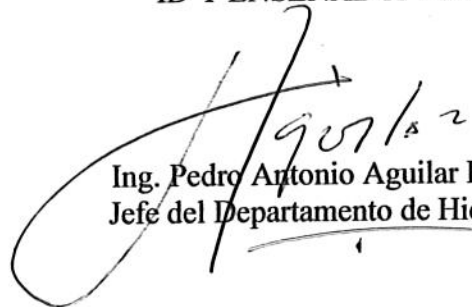
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Alexis Fernando García Vásquez, 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

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

/bbdeb  
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Coordinador del Departamento de Hidraulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Alexis Fernando García Vásquez, titulado CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS TRIANGULARES DE PARED DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, julio 2015

/bbdeb.

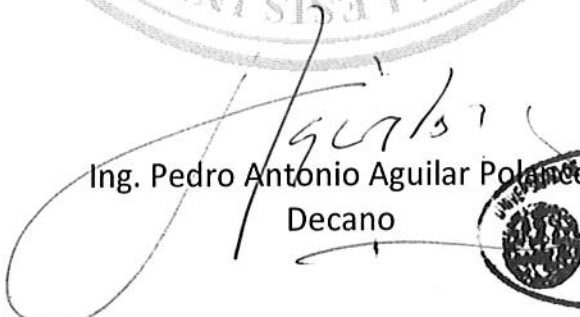
Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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 TRIANGULARES DE PARED DELGADA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE ABERTURA**, presentado por el estudiante universitario: **Alexis Fernando García Vásquez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

Decano



Guatemala, 20 de julio de 2015

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mis padres**

Por su ejemplo y sacrificio, pero más que todo su incondicional amor.

**Mi familia**

Por siempre creer en que podía llegar a la meta.

**Mis amigos**

Compañeros de aventuras y cómplices de mis logros, sé que se darán por aludidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mi Padre Celestial</b>	Porque solo teniéndolo como luz y guía pude llegar hasta aquí.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Porque a través de mi paso por sus aulas y pasillos formé mi carácter y obtuve valores que hasta hoy día rigen mi vida.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Porque al admitir que no fue fácil va implícito el alto nivel académico logrado.
<b>Ing. Luis Sandoval</b>	Por compartir en todo momento sus conocimientos y ser siempre, además de un maestro, amigo.
<b>Adrián Escobar</b>	Por su total apoyo en la realización de los ensayos para este estudio.

## INDICE 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.....	2
1.1.1. Importancia de la medición de caudales.....	4
2. VERTEDEROS.....	7
2.1. Definición de vertederos.....	7
2.2. Clasificación de vertederos .....	8
2.2.1. Vertederos de pared delgada .....	8
2.2.1.1. Velocidad de aproximación .....	10
2.2.2. Secciones típicas.....	10
2.2.3. Vertederos de sección rectangular .....	11
2.2.4. Vertederos de sección triangular .....	13
2.2.5. Vertederos de sección trapezoidal.....	13
2.2.6. Fundamento teórico para el cálculo de caudales en vertederos .....	14
2.2.7. Criterios para la selección de un vertedero de medición .....	16

3.	ENSAYOS DE VERTEDEROS .....	19
3.1.	Calibración de volumen del tanque de aforo .....	19
3.2.	Diseño y construcción de vertederos de pared delgada para la medición de caudales.....	21
3.3.	Realización del ensayo .....	24
3.4.	Obtención de resultados .....	25
3.4.1.	Calibración de vertedero triangular de 10° (VT-10°).....	25
3.4.2.	Calibración de vertedero triangular de 20° (VT-20°).....	32
3.4.3.	Calibración de vertedero triangular de 30° (VT-30°).....	37
3.4.4.	Calibración de vertedero triangular de 40° (VT-40°).....	41
3.4.5.	Calibración de vertedero triangular de 45° (VT-45°).....	46
3.4.6.	Calibración de vertedero triangular de 50° (VT-50°).....	51
3.4.7.	Calibración de vertedero triangular de 60° (VT-60°).....	56
3.4.8.	Calibración de vertedero triangular de 70° (VT-70°).....	61
3.4.9.	Calibración de vertedero triangular de 80° (VT-80°).....	66
3.4.10.	Calibración de vertedero triangular de 90° (VT-90°).....	71
3.5.	Sistema estadístico informático SPSS .....	76
3.5.1.	Calibración de vertedero VT-10°/SPSS.....	77
3.5.2.	Calibración de vertedero VT-20°/SPSS.....	79

3.5.3.	Calibración de vertedero VT-30°/SPSS .....	80
3.5.4.	Calibración de vertedero VT-40°/SPSS .....	81
3.5.5.	Calibración de vertedero VT-45°/SPSS .....	82
3.5.6.	Calibración de vertedero VT-50°/SPSS .....	83
3.5.7.	Calibración de vertedero VT-60°/SPSS .....	84
3.5.8.	Calibración de vertedero VT-70°/SPSS .....	85
3.5.9.	Calibración de vertedero VT-80°/SPSS .....	86
3.5.10.	Calibración de vertedero VT-90°/SPSS .....	87
CONCLUSIONES .....		89
RECOMENDACIONES .....		91
BIBLIOGRAFÍA .....		93
ANEXOS .....		95



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Flujo de agua en un río .....	1
2.	Aforo de un cauce .....	3
3.	Medición de caudales en un río .....	5
4.	Tipos de vertederos .....	8
5.	Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada .....	10
6.	Tipo de vertederos de pared delgada .....	14
7.	Descarga a través de un vertedero .....	14
8.	Vertedero de sección triangular .....	15
9.	Calibración del tanque de aforo .....	19
10.	Instalación del tubo piezómetro.....	20
11.	Calibración de recipiente a través de probetas .....	20
12.	Determinación de la ecuación de calibración .....	21
13.	Canal hidrodinámico del Laboratorio de Hidráulica .....	22
14.	Elaboración de vertederos .....	23
15.	Diseño de vertederos .....	23
16.	Realización de ensayos .....	25
17.	Vertedero triangular de 10° (VT-10°).....	26
18.	Curvas de descarga VT-10° .....	28
19.	Obtención del coeficiente de descarga VT-10° .....	29
20.	Obtención de la ecuación experimental VT-10° .....	30
21.	Relación de caudales VT-10°.....	32
22.	Vertedero triangular de 20° (VT-20°).....	32
23.	Curvas de descarga VT-20° .....	34

24.	Obtención del coeficiente de descarga VT-20° .....	34
25.	Obtención de la ecuación experimental VT-20° .....	35
26.	Relación de caudales VT-20° .....	36
27.	Vertedero triangular de 30° (VT-30°) .....	37
28.	Curvas de descarga VT-30° .....	38
29.	Obtención del coeficiente de descarga VT-30° .....	39
30.	Obtención de la ecuación experimental VT-30° .....	40
31.	Relación de caudales VT-30° .....	41
32.	Vertedero triangular de 40° (VT-40°) .....	41
33.	Curvas de descarga VT-40° .....	43
34.	Obtención del coeficiente de descarga VT-40° .....	43
35.	Obtención de la ecuación experimental VT-40° .....	44
36.	Relación de caudales VT-40° .....	45
37.	Vertedero triangular de 45° (VT-45°) .....	46
38.	Curvas de descarga VT-45° .....	48
39.	Obtención del coeficiente de descarga VT-45° .....	48
40.	Obtención de la ecuación experimental VT-45° .....	49
41.	Relación de caudales VT-45° .....	50
42.	Vertedero triangular de 50° (VT-50°) .....	51
43.	Curvas de descarga VT-50° .....	53
44.	Obtención del coeficiente de descarga VT-50° .....	53
45.	Obtención de la ecuación experimental VT-50° .....	54
46.	Relación de caudales VT-50° .....	55
47.	Vertedero triangular de 60° (VT-60°) .....	56
48.	Curvas de descarga VT-60° .....	58
49.	Obtención del coeficiente de descarga VT-60° .....	58
50.	Obtención de la ecuación de descarga VT-60° .....	59
51.	Relación de caudales VT-60° .....	60
52.	Vertedero triangular de 70° (VT-70°) .....	61



53.	Curvas de descarga VT-70° .....	63
54.	Obtención de la ecuación de descarga VT-70° .....	63
55.	Obtención de la ecuación experimental VT-70° .....	64
56.	Relación de caudales VT-70° .....	65
57.	Vertedero triangular de 80° (VT-80°).....	66
58.	Curvas de descarga VT-80° .....	68
59.	Obtención del coeficiente de descarga VT-80° .....	68
60.	Obtención de la ecuación experimental VT-80° .....	69
61.	Relación de caudales VT-80° .....	70
62.	Vertedero triangular de 90° (VT-90°).....	71
63.	Curvas de descarga VT-90° .....	73
64.	Obtención del coeficiente de descarga VT-90° .....	73
65.	Obtención de la ecuación experimental VT-90° .....	74
66.	Relación de caudales VT-90° .....	75
67.	Programa estadístico SPSS/Creando parámetros .....	76
68.	Programa estadístico SPSS/definiendo ecuación .....	77
69.	Curvas de descarga VT-10°/SPSS .....	78
70.	Curvas de descarga VT-20°/SPSS .....	79
71.	Curvas de descarga VT-30°/SPSS .....	80
72.	Curvas de descarga VT-40°/SPSS .....	81
73.	Curvas de descarga VT-45°/SPSS .....	82
74.	Curvas de descarga VT-50°/SPSS .....	83
75.	Curvas de descarga VT-60°/SPSS .....	84
76.	Curvas de descarga VT-70°/SPSS .....	85
77.	Curvas de descarga VT-80°/SPSS .....	86
78.	Curvas de descarga VT-90°/SPSS .....	87

## TABLAS

I.	Valores para un vertedero rectangular.....	12
II.	Datos obtenidos para el vertedero VT-10°.....	26
III.	Caudales reales observados VT-10°.....	27
IV.	Relación de caudales VT-10°.....	31
V.	Datos obtenidos para el vertedero VT-20°.....	33
VI.	Caudales reales observados VT-20°.....	33
VII.	Relación de caudales VT-20°.....	36
VIII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-30°.....	37
IX.	Caudales reales observados VT-30°.....	38
X.	Relación de caudales VT-30°.....	40
XI.	Datos obtenidos para el vertedero VT-40°.....	42
XII.	Caudales reales observados VT-40°.....	42
XIII.	Relación de caudales VT-40°.....	45
XIV.	Datos obtenidos para el vertedero VT-45°.....	46
XV.	Caudales reales observados VT-45°.....	47
XVI.	Relación de caudales VT-45°.....	50
XVII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-50°.....	51
XVIII.	Caudales reales observados VT-50°.....	52
XIX.	Relación de caudales VT-50°.....	55
XX.	Datos obtenidos para el vertedero VT-60°.....	56
XXI.	Caudales reales observados VT-60°.....	57
XXII.	Relación de caudales VT-60°.....	60
XXIII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-70°.....	61
XXIV.	Caudales reales observados VT-70°.....	62
XXV.	Relación de caudales VT-70°.....	65
XXVI.	Datos obtenidos para el vertedero VT-80°.....	66
XXVII.	Caudales reales observados VT-80°.....	67

XXVIII.	Relación de caudales VT-80° .....	70
XXIX.	Datos obtenidos para el vertedero VT-90° .....	71
XXX.	Caudales reales observados VT-90° .....	72
XXXI.	Relación de caudales VT-90° .....	75
XXXII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-10°/SPSS.....	78
XXXIII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-20°/SPSS.....	79
XXXIV.	Datos obtenidos para el vertedero VT-30°/SPSS.....	80
XXXV.	Datos obtenidos para el vertedero VT-40°/SPSS.....	81
XXXVI.	Datos obtenidos para el vertedero VT-45°/SPSS.....	82
XXXVII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-50°/SPSS.....	83
XXXVIII.	Datos obtenidos para el vertedero VT-60°/SPSS.....	84
XXXIX.	Datos obtenidos para el vertedero VT-70°/SPSS.....	85
XL.	Datos obtenidos para el vertedero VT-80°/SPSS.....	86
XLI.	Datos obtenidos para el vertedero VT-90°/SPSS.....	87



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad
<b>H</b>	Altura de carga alcanzada por el agua
<b>B</b>	Ancho de canal de acceso al vertedero
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo Teta
<b>Q</b>	Caudal
<b>K</b>	Coeficiente
<b>Cd</b>	Coeficiente de descarga
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>d</b>	Distancia de aguas arriba del vertedero para efectuar lecturas de carga.
<b>Z</b>	Energía potencial
<b>lt</b>	Litros
<b><math>\gamma</math></b>	Peso específico
<b>P</b>	Presión
<b>tg</b>	Tangente
<b>t</b>	Tiempo
<b><math>V_x</math></b>	Velocidad de flujo en X u horizontal
<b>V</b>	Volumen



## GLOSARIO

<b>Aforo</b>	Medida de la cantidad de agua de una corriente por unidad de tiempo.
<b>Biselado</b>	Corte oblicuo en el borde de una superficie.
<b>Carga</b>	Es una elevación de la superficie del fluido, expresada en unidades de altura.
<b>Caudal</b>	Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.
<b>Fluido</b>	Es una sustancia que se deforma continuamente, engloba líquidos y gases.
<b>Flujo</b>	Es el cuerpo que atraviesa una sección transversal.
<b>Piezómetro</b>	Instrumentos utilizados para medir la presión del agua.
<b>Tirante</b>	Altura de la superficie libre que alcanza un fluido estático o dinámico.
<b>Vertedero</b>	Estructura hidráulica destinada a permitir el paso, libre o controlado, de un fluido.





## RESUMEN

La medición de flujo es importante para hacer el manejo del agua más eficiente, teniendo en cuenta que este líquido vital se escasea cada vez más en distintas partes del mundo, por tal razón se debe evitar desperdicios en la ingeniería civil. La investigación de los coeficientes de descarga, velocidad y contracción en los vertederos de pared delgada, definen ecuaciones únicas en estructuras hidráulicas que miden principalmente caudales de flujo.

En el capítulo 1 se mencionan principios básicos acerca de la mecánica de fluidos para las mediciones de flujo así como la importancia que se deriva de la buena práctica de estos.

En el capítulo 2 están las definiciones de los vertederos y las ecuaciones teóricas de descarga para las distintas secciones geométricas.

En el capítulo 3 se da a conocer la investigación concentrada en la calibración de vertederos triangulares y consiste en realizar aforos para los diferentes ángulos de abertura de los dispositivos de medición en cuestión y a su vez para distintos tirantes o alturas de flujo dentro del canal. Esto para obtener ecuaciones experimentales que sean comparables con las ecuaciones teóricas y así determinar factores de descarga, reales observados, para cada vertedero. También incluye una serie de cálculos realizados mediante un programa computarizado que toma datos estadísticos para convertirlos en modelos matemáticos utilizables para este tipo de estudios.

Los ensayos se realizaron en condiciones controladas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Los valores encontrados en esta investigación siguen la tendencia de resultados desarrollados en procesos experimentales que muestran factores de corrección para una descarga teórica.

# OBJETIVOS

## General

Construir vertederos de pared delgada de sección triangular con diferentes ángulos de abertura y calibrar los mismos mediante la realización de ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.

## Específicos

1. Construir y calibrar distintos vertederos de pared delgada de secciones triangulares, cada uno con distintos valores de abertura angular.
2. Corregirlas ecuaciones teóricas mediante ensayos de laboratorio.
3. Deducir la ecuación de descarga para cada vertedero de forma experimental y encontrar la relación entre el ángulo de abertura y la descarga.
4. Brindarle al Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, el material elaborado para fines didácticos e implementar prácticas de medición de flujo, para que continúe con sus labores investigativas.



## INTRODUCCIÓN

El agua constituye el líquido vital para los seres humanos, las plantas y los animales. Es uno de los principales componentes que mantiene en equilibrio el medio ambiente y resulta ser un insumo fundamental en cualquier tipo de obra o proyecto. En la actualidad es importante tener un control sobre el uso de este recurso, una especie de inventario de los recursos hídricos con que se cuenta se logra a través de aforos, que a su vez no son más que mediciones realizadas para determinar el caudal, gasto o descarga que puede existir en un río o cualquier curso de agua. Dicha importancia puede verse desde diferentes puntos de vista, como saber la disponibilidad de agua con que se cuenta, distribuir el agua a los usuarios en la cantidad deseada, conocer el volumen de agua con que se riegan los cultivos, para determinar la eficiencia de uso y de manejo y otros.

Conociendo la importancia de estas mediciones, no está demás enfatizar la necesidad de utilizar métodos precisos para realizar los aforos, que para este caso en particular, se enfocará en la calibración de vertederos de pared delgada, de sección triangular. Esto se realizó para diferentes valores de ángulo de abertura, buscando que lo anterior, en conjunto con un meticuloso análisis y procesamiento de datos de ensayo, logre resultados satisfactorios que puedan ser utilizados en proyectos de desarrollo sostenible.



## 1. MEDICIÓN DE CAUDALES

El estudio del movimiento de los fluidos se puede realizar a través de la dinámica como también de la energía que tienen en su movimiento.

Una forma de estudiar el movimiento es fijar la atención en una zona del espacio, en un punto, en un instante  $t$ , en él se especifica la densidad, la velocidad y la presión del fluido. En ese punto se examina lo que sucede con el fluido que pasa por él y de esta manera se podrán obtener los resultados deseados.

Al movimiento de un fluido se le llama “flujo”, que para este estudio se enfocará en canales.

Figura 1. **Flujo de agua en un río**



Fuente: MATAIX, Claudio. *Fundamentos de mecánica y fluidos*.  
<[https://www.google.com.gt/fundamentos\\_mecanica\\_fluidos](https://www.google.com.gt/fundamentos_mecanica_fluidos)>. [Consulta: 12 de mayo de 2014].

## 1.1. Hidrometría

Se define como la parte de la hidrología que tiene por objeto medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería. Estos son pertenecientes a un pequeño o gran sistema en funcionamiento. Aparte de medir el agua, comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra.

Un sistema hidrométrico es el conjunto de pasos, actividades y procedimientos tendientes a conocer (medir, registrar, calcular y analizar) los volúmenes de agua que circulan en cauces y canales de un sistema, con el fin de programar, corregir y mejorar la distribución del agua. El sistema hidrométrico tiene como soporte físico una red hidrométrica, que a su vez, es un conjunto de puntos de medición estratégicamente ubicados, de tal forma que constituya una red que permita interrelacionar la información obtenida.

En este tipo de sistemas existen puntos de control donde se registran los caudales que pasan por la sección transversal y existen gran variedad de tipos según el cauce que quiera medirse, como lo son: estaciones hidrométricas en ríos, presas de almacenamiento, compuertas en una estructura de captación o de toma, vertederos, medidores *parshall* y otros.



Figura 2. **Aforo de un cauce**



Fuente: MATAIX, Claudio. *Fundamentos de mecánica y fluidos*.  
<[https://www.google.com.gt/fundamentos\\_mecanica\\_fluidos](https://www.google.com.gt/fundamentos_mecanica_fluidos)>. [Consulta: 10 de mayo de 2014].

Los procedimientos de empleo más generalizados para el aforo, como se conocen estas mediciones de caudales en corrientes de agua, se basan en estimar la velocidad media en una sección correspondiente:

$$Q = A \bar{v}$$

Q: caudal, medido en m<sup>3</sup> por segundo

A: área de la sección transversal, medida en m<sup>2</sup>

$\bar{v}$ : velocidad media del agua, en m/s

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

Esto describe la función principal de la hidrometría que es proveer de datos oportunos y veraces, a través de mediciones de caudales. Una vez procesados proporcionan información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución, evaluación y balance en el manejo del agua. El uso de una información adecuada permitirá:

- Mediante aforos en la fuente (río, aguas subterráneas y otras) conocer los volúmenes probables de agua de los que se puede disponer, por lo que este tipo de información es de suma importancia para la elaboración de un balance hídrico, planificación de siembras o un plan de distribución del agua.
- Monitorear la ejecución de la distribución de agua a un sistema. La Hidrometría proporciona los resultados que permiten conocer la cantidad, calidad y la oportunidad del agua; estableciendo si los caudales en un plan de distribución son los realmente necesarios y sobre esta base decidir la modificación de los mismos, en caso sea necesario.

Figura 3. **Medición de caudales en un río**



Fuente: MATAIX, Claudio. *Fundamentos de mecánica y fluidos*.  
<[https://www.google.com.gt/fundamentos\\_mecanica\\_fluidos](https://www.google.com.gt/fundamentos_mecanica_fluidos)>. [Consulta: 12 de mayo de 2014].



## **2. VERTEDEROS**

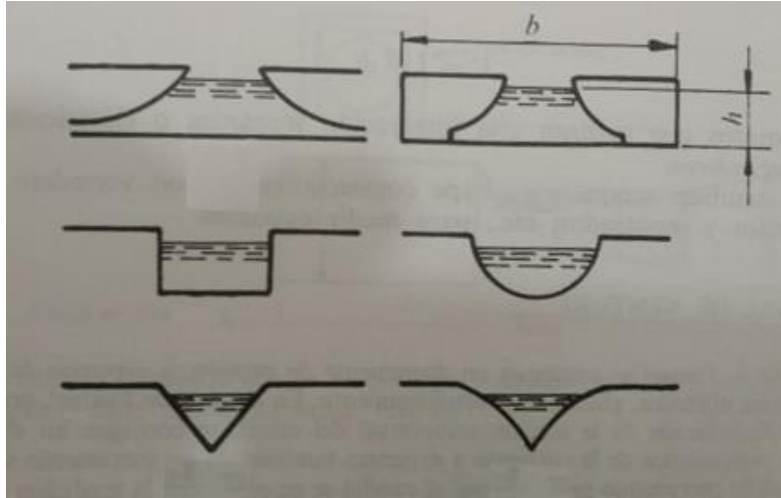
### **2.1. Definición de vertederos**

Es una barrera que se inserta dentro de una corriente a superficie libre y de este modo obliga a que el líquido retroceda un poco atrás y fluya sobre o a través de ella. Aunque existe cierta similitud con el sistema de las compuertas, la diferencia es que en estas últimas el flujo supera el obstáculo por la parte inferior.

La intromisión dentro de la corriente puede inducir un choque hidráulico, y con ello establecer un régimen subcrítico aguas arriba y supercrítico aguas abajo. En estas circunstancias un vertedero es un control hidráulico; de ahí su utilidad como aforador de caudales. Para hacer una referencia muy sencilla y haciendo énfasis en el concepto de barrera, definido en un principio, un derrumbe que obstaculice el paso del flujo y lo fuerce a fluir por encima de él funciona como una especie de vertedero.

Un vertedero puede construirse de distintas formas geométricas en su sección transversal. Se denomina cresta del vertedero a la parte más elevada del fondo de este y su altura se mide desde el fondo del canal de aproximación hasta la cresta y es quizás la variable más determinante para desarrollar el control del flujo. Un vertedero es en sí mismo un canal y como tal posee una longitud que se denomina ancho de cresta o, así mismo, espesor o ancho de la pared.

Figura 4. Tipos de vertederos



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 294.

## 2.2. Clasificación de vertederos

Según el caudal de aforo o las características del lugar en donde será instalado, los vertederos de pared delgada pueden tomar diferentes formas en su sección transversal, las cuales se describen a continuación.

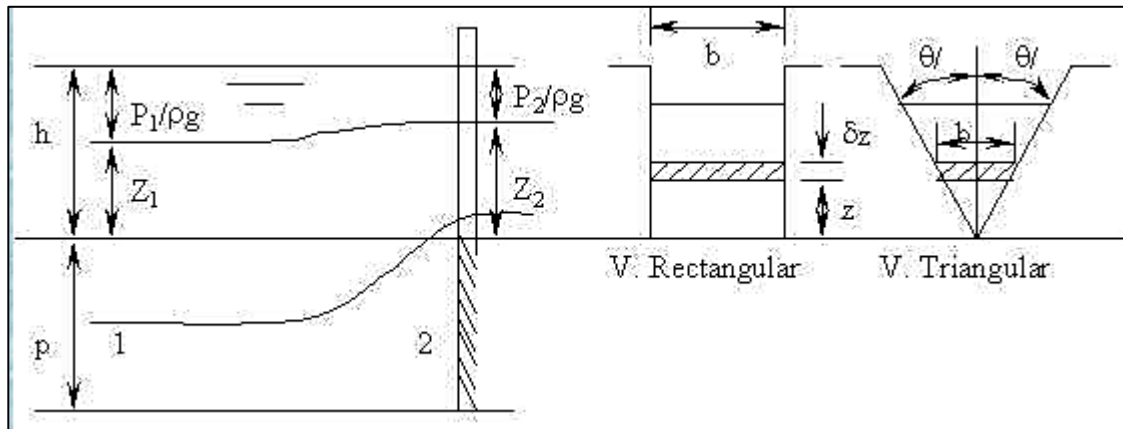
### 2.2.1. Vertederos de pared delgada

El caudal en un canal abierto puede ser medido mediante un vertedero. Si se mide la altura de la superficie líquida, de la corriente aguas arriba, es posible determinar el caudal. Los vertederos construidos con una hoja de metal u otro material, permiten que el chorro o manto salgan libremente y reciben el nombre de vertederos de pared delgada. Si por el contrario, el contacto entre la pared y la lámina vertiente es más bien toda una superficie, se denomina de pared gruesa.

El vertedero triangular es preferido cuando las descargas son pequeñas, porque la sección transversal de la lámina vertiente muestra, de manera notoria, la variación en altura. La relación entre la descarga y la altura sobre la cresta del vertedero puede obtenerse matemáticamente haciendo las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:

- Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad de acuerdo con la hidrostática ( $P = \rho gh$ ).
- La superficie libre permanece horizontal hasta el plano del vertedero y todas las partículas que pasan sobre el vertedero se mueven horizontalmente (en realidad la superficie libre cae cuando se aproxima al vertedero).
- La presión a través de la lámina de líquido o napa que pasa sobre la cresta del vertedero es la atmosférica.
- Los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial son despreciables.
- Estas suposiciones conducen al siguiente modelo de flujo ideal:

Figura 5. Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada*.

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/medidores/vertparedelg>.

Consulta: 12 de mayo de 2014.

### Velocidad de aproximación

Es la velocidad promedio en un corte transversal situado aguas arriba, a una distancia de hasta 10 veces el ancho de solera del vertedero.

#### 2.2.2. Secciones típicas

La utilización de vertederos de pared delgada está limitada generalmente a laboratorios, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros y sedimentos. Los tipos más comunes son el vertedero rectangular y el triangular. La cara de aguas arriba debe ser instalada verticalmente y el borde de la placa debe estar cuidadosamente conformado. La estructura delgada está propensa a deteriorarse y con el tiempo la calibración puede ser afectada por la erosión de la cresta.



### 2.2.3. Vertederos de sección rectangular

La fórmula fundamental de caudal vertido en vertederos de sección rectangular, sin contracción, también conocido como vertedero de Bazin es:

$$Q = C_w^1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot g} \cdot L \left( \left( h + \frac{V_0^2}{2 \cdot g} \right)^{2/3} - \left( \frac{V_0^2}{2 \cdot g} \right)^{2/3} \right)$$

- $Q$  = caudal en  $m^3/s$ .
- $C_w^1$  = es un coeficiente indicador de las condiciones de escurrimiento del agua sobre el vertedero.
- $L$  = longitud de la solera del vertedero en m.
- $h$  = altura de la lámina vertiente sobre la cresta en m.
- $g$  = aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$ .
- $V_0$  = velocidad de llegada de la corriente inmediatamente aguas arriba del vertedero, en  $m/s$ .

Si el vertimiento fuera de lámina contraída se debe hacer una corrección, substrayendo:  $0.1 h$  del valor de  $L$  por cada contracción.

Cuando la velocidad de aproximación es baja se puede simplificar la ecuación de la siguiente forma:

$$Q = C_w \cdot L \cdot h^{3/2}$$

Donde:

- $C_w$  - es un coeficiente de descarga que hace más preciso el cálculo de caudales y además de otros factores considera la velocidad de aproximación.

Las características del tipo de flujo que afectan  $C_w$  pueden ser definidas

por  $h$  y  $\frac{H_d}{h}$

Donde:

- $H_d$  = altura del vertedero en m

Los valores de  $C_w$  se encuentran en la tabla siguiente

Tabla I. **Valores para un vertedero rectangular**

$H_d/h$	$h=0,05$	$h=0,10$	$h=0,20$	$h=0,40$	$h=0,60$	$h=0,80$	$h=1,00$	$h=1,50$
0,5	2,316	2,285	2,272	2,266	2,263	2,262	2,262	2,261
1,0	2,082	2,051	2,037	2,030	2,027	2,026	2,025	2,024
2,0	1,964	1,933	1,919	1,912	1,909	1,908	1,907	1,906
10,0	1,870	1,839	1,824	1,817	1,815	1,814	1,813	1,812
$\infty$	1,846	1,815	1,801	1,793	1,791	1,790	1,789	1,788

Fuente: elaboración propia.

#### 2.2.4. Vertederos de sección triangular

Para medir caudales muy pequeños (menos de 6 litros por segundo), se obtiene mejor precisión utilizando vertederos de pared delgada de sección triangular, pues la presión varía con la altura, dándose un gran gradiente de velocidad entre la parte inferior del triángulo y la superior. Dentro de los límites definidos para este tipo de vertedero, los vertederos triangulares de pared delgada son los más precisos, económicos, simples de construir y de instalar. El caudal sobre un aliviadero triangular está dado por la fórmula:

$$Q = C_w^1 \cdot \frac{8}{15} \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{5/2} \tan(\beta/2)$$

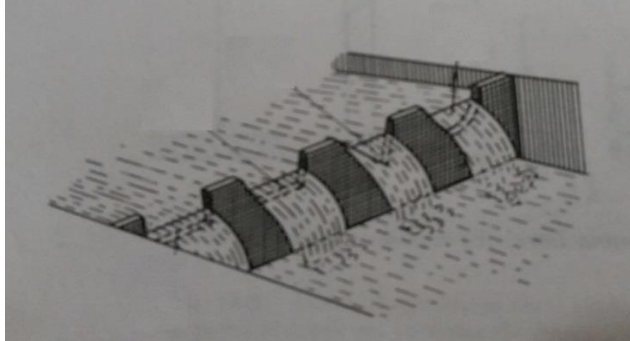
Donde:

- $\beta$  = ángulo del vértice del triángulo.
- $C_w^1$  = aproximadamente igual a 0,58 variando ligeramente con la carga y el ángulo de la abertura.

#### 2.2.5. Vertederos de sección trapezoidal

El ingeniero Cipoletti propuso un vertedero para eliminar la corrección y longitud efectiva de la cresta. Este vertedero es el trapezoidal, conocido también como vertedero de Cipoletti, tiene los bordes con una inclinación de 4 cm verticales a 1 cm horizontal. La ecuación para el caudal a través del vertedero es:  $Q=1,86 LH^{3/2}$ . En la instalación del vertedero trapezoidal H debe ser mayor de los 6 cm y deben seleccionarse las dimensiones de manera que H sea menor que L/3.

Figura 6. **Tipo de vertederos de pared delgada**

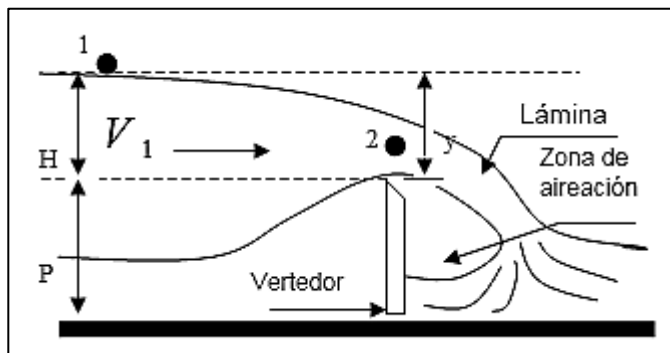


Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 299.

### 2.2.6. **Fundamento teórico para el cálculo de caudales en vertederos**

La figura muestra la descarga a través de un vertedor de cualquier forma geométrica, aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 mostrados obteniendo:

Figura 7. **Descarga a través de un vertedero**



Fuente: SANDOVAL Luis. *Laboratorio de Hidráulica*, FIUSAC.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2$$

$$V_1 = 0$$

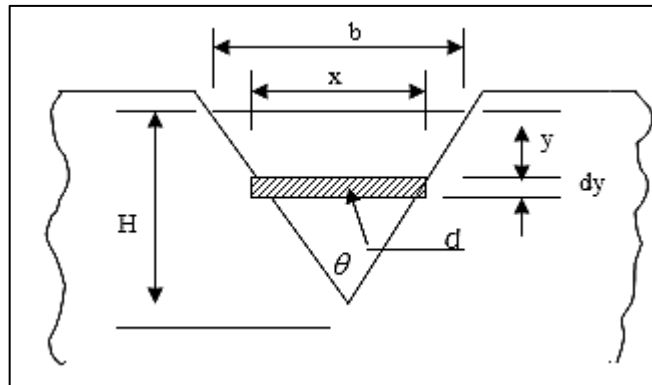
$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$Z_1 = H + P$$

$$Z_2 = H + P - y \quad \text{Sustituyendo y despejando}$$

$$H + P = \frac{V_2^2}{2g} + H + P - y \Rightarrow V_2 = \sqrt{2gy}$$

Figura 8. **Vertedero de sección triangular**



Fuente: SANDOVAL Luis. *Laboratorio de Hidráulica*, FIUSAC.

Para el caudal:

$dQ = V_2 dA$ , por semejanza de triángulos:

$$\frac{x}{b} = \frac{H - y}{H} \quad \text{y} \quad b = 2H \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}, \text{ luego}$$

$$Q = 2\sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \int_0^H (H - y)y^2 dy, \text{ integrando}$$

$$Q_{teórico} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

La deducción de la ecuación anterior no toma en cuenta los efectos de la contracción y la pérdida de energía, por esta razón el caudal teórico se reduce en cierta medida, introduciendo un factor de corrección llamado coeficiente de descarga  $cd$  para obtener el caudal real, quedando la ecuación así:

$$Q_{real} = cd \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

El coeficiente de descarga  $cd$  depende de la geometría del vertedero, en el caso del vertedero triangular este coeficiente tiene valores cercanos a 0,6.

### **2.2.7. Criterios para la selección de un vertedero de medición**

Los siguientes puntos básicos deben considerarse cuando se trata de seleccionar un vertedero adecuado para medir un caudal:

- La carga hidráulica mínima para vertederos triangulares es de 6 cm y para rectangulares 2 cm, a fin de evitar que la lámina de agua quede adherida a la solera.
- La carga hidráulica máxima aceptable es de 50 cm, a fin de evitar problemas de erosión y construcción.
- Siempre debe darse preferencia al uso de vertederos rectangulares para caudales estimados superiores a los 300l/s, por poseer coeficientes de caudal mejor definidos, ofreciendo en consecuencia, mayor precisión en el cálculo de los caudales.

- Para caudales estimados inferiores a 30l/s, los vertederos triangulares con ángulos de corte de 90° son los que ofrecen mayor precisión.
- Para caudales que se estiman entre 30l/s y 300l/s, los vertederos triangulares ofrecen la misma precisión en relación a los vertederos rectangulares.
- Por motivos de orden práctico, los vertederos rectangulares se usan para caudales que se estima no serán superiores a 1 000 l/s.



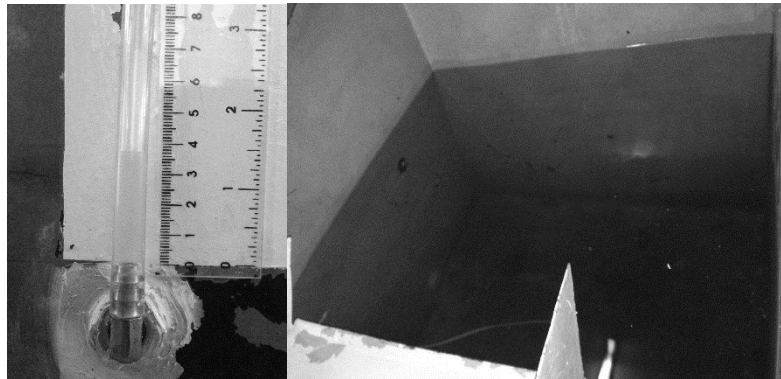


### 3. ENSAYOS DE VERTEDEROS

#### 3.1. Calibración de volumen del tanque de aforo

Para la realización de este estudio fue necesaria la calibración del tanque ubicado al final del canal hidrodinámico. Es necesario determinar el volumen del tanque de forma precisa pues será utilizado para el aforo de los vertederos. Los pasos para realizar la calibración del volumen del tanque son los siguientes:

Figura 9. Calibración del tanque de aforo



Fuente: Tanque canal hidrodinámico. *Laboratorio de Hidráulica*, FIUSAC.

- Se perforó el tanque en la parte baja para instalar un tubo piezómetro que permitiera hacer las mediciones. El objetivo de instalarlo lo más cerca posible de la base fue para analizar que el tipo de vertederos de los caudales a manejar serían muy pequeños. Entonces entre más alto estuviera el piezómetro, mayor es el tiempo de llenado del mismo.

Figura 10. **Instalación del tubo piezómetro**



Fuente: Tanque canal hidrodinámico. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

- Se empleó una probeta de 1lt con la que se aforó un recipiente, marcando a cada 10lt se determinó que tenía una capacidad de 50lt. Esto para hacer más eficiente el mismo proceso a una escala mayor en el tanque del sistema.

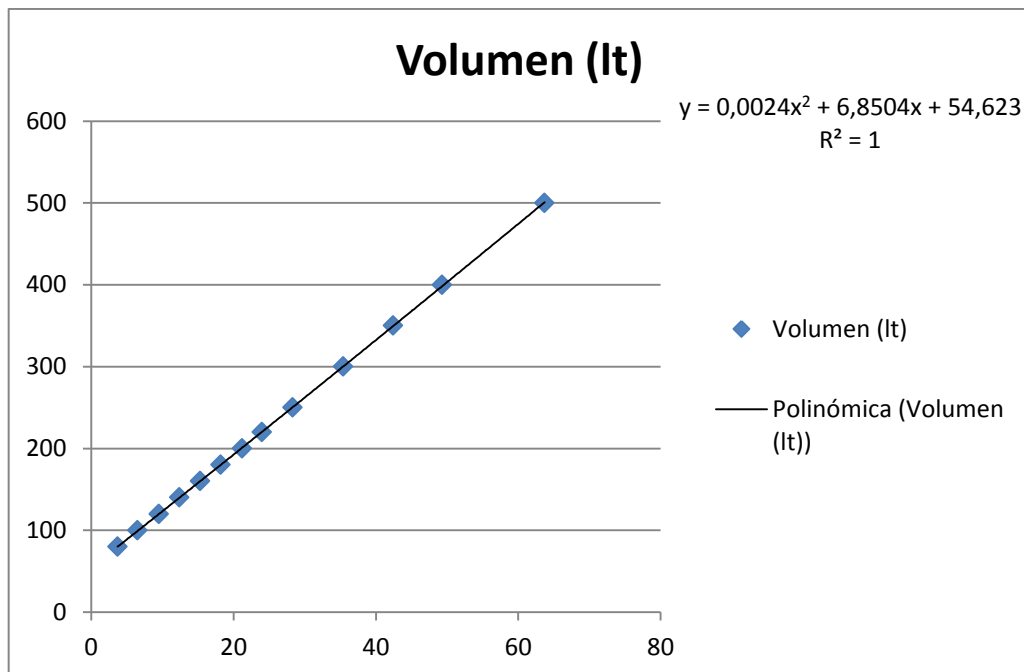
Figura 11. **Calibración de recipiente a través de probetas**



Fuente: Aforo con probetas. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

- Ya instalado el piezómetro y con el tanque totalmente seco se procede a ingresar volúmenes de agua conocidos al tanque. De esta manera en cada ingreso de fluido se toma una altura  $h$  en el piezómetro y por medio de regresión lineal se determina la fórmula que relaciona el volumen del tanque, en litros, en función de una altura medida en centímetros.

Figura 12. **Determinación de la ecuación de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. **Diseño y construcción de vertederos de pared delgada para la medición de caudales**

El diseño de los vertederos, a ser utilizados, se realizó con base en las dimensiones del canal de ensayos que posee el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC.

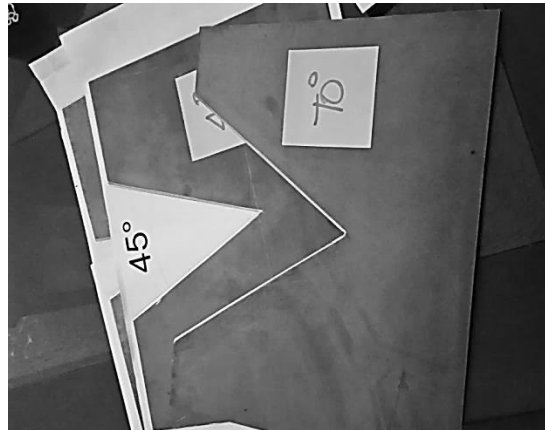
Figura 13. Canal hidrodinámico del Laboratorio de Hidráulica



Fuente: Canal Hidrodinámico. *Laboratorio de Hidráulica*, FIUSAC.

Cada vertedero fue construido con lámina metálica de un espesor de  $3/64$ " revestidos con una capa de pintura anticorrosiva prolongando su tiempo de uso. Está provisto con unas tiras de caucho de 1" de grosor instaladas en las áreas de contacto con el canal que fungían como empaques para evitar filtraciones o fugas que pudieran afectar las mediciones y la escotadura que forma la V. Se diseñó con un bisel que permite el menor contacto del fluido con la pared del vertedero haciendo que pueda tener una salida en forma parabólica estableciendo una zona aireada bajo la cresta de la escotadura.

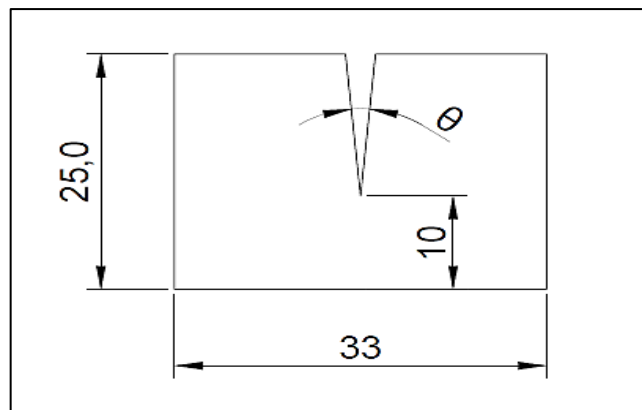
Figura 14. **Elaboración de vertederos**



Fuente: Fabricación vertederos. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

Los vertederos fueron elaborados con un ángulo de abertura específico, que según consideraciones del estudio se fijó para una variación de  $10^\circ$  entre cada uno de ellos.

Figura 15. **Diseño de vertederos**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

### 3.3. Realización del ensayo

- Fijar el vertedero a la estructura del canal procurando que el empaque provisto quede lo suficientemente presionado evitando filtraciones en los bordes que pudieran afectar las lecturas.
- Arrancar la bomba que suministra el agua al sistema y controlar el flujo de agua al canal de tal manera que pueda estabilizarse el tirante de agua ligeramente por debajo de la altura máxima del vertedero. Esto para realizar las lecturas de los tirantes de mayor a menor, para que la bomba trabaje sin forzarse y que el tiempo de estabilización de las alturas de carga sea menor.

Las alturas, tomadas en cuenta, son las que presenten una zona aireada bajo la cresta del vertedero y con esto no presenten escurrimiento.

- Las alturas de carga o tirantes deben ser medidos a una distancia mayor a  $4H$  ( $d \geq 4H$ ), sobre el eje longitudinal del canal y a partir de la ubicación del vertedero. Para este ensayo cada altura fue corroborada con un limnómetro instalado en el sistema.
- Realizar lecturas de carga  $H$  y efectuar 3 aforos volumétricos midiendo el volumen en el tanque de quietamiento al final del canal y tomando lecturas de los tiempos de llenado. Se utiliza un cronómetro adecuado.
- Estrangular el flujo de agua mediante una válvula, y repetir los pasos anteriores a manera de obtener 7 tomas de alturas de carga como mínimo. Entre más sean las lecturas hará que el estudio sea más exacto en cuanto a resultados.

Figura 16. **Realización de ensayos**



Fuente: Realización de ensayos. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

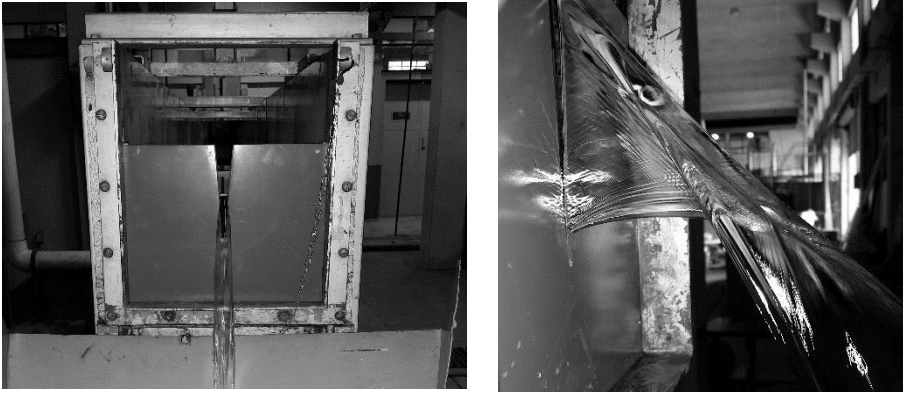
### **3.4. Obtención de resultados**

Uno de los objetivos de este estudio es deducir la ecuación de descarga para cada vertedero de forma experimental y encontrar la relación entre el ángulo de apertura y la descarga para lo que se presenta a continuación la obtención de resultados.

#### **3.4.1. Calibración de vertedero triangular de 10° (VT-10°)**

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-10°.

Figura 17. **Vertedero triangular de 10° (VT-10°)**



Fuente: Vertedero VT-10°. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

Tabla II. **Datos obtenidos para el vertedero VT-10°**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
13,6	129,19	142,01	153,68	166,23	177,15	189,12
12	199,78	158,61	225,4	178,71	241,63	189,12
11,7	209,46	162,77	267,34	204,41	295,69	222,5
10,6	172,69	106,82	209,57	126,13	235,28	139,94
7,6	254,94	71,76	298,87	86,87	373	108,2
6,2	1042,93	175,24	924,47	162,77	617,22	110,27
5,4	532,79	77,26	513,09	71,08	556,91	77,94

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en el ensayo se procede a calcular los respectivos caudales. Se utiliza el método de aforo volumétrico, para las diferentes alturas o tirantes. El resultado del promedio entre estos datos será el caudal real observado.



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

Donde:

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

V = volumen = litros

T = tiempo = segundos

Tabla III. Caudales reales observados VT-10°

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
13,6	1,10	1,08	1,07	1,08
12	0,79	0,79	0,78	0,79
11,7	0,78	0,76	0,75	0,76
10,6	0,62	0,60	0,59	0,61
7,6	0,28	0,29	0,29	0,29
6,2	0,17	0,18	0,18	0,17
5,4	0,15	0,14	0,14	0,14

Fuente: elaboración propia.

Como se indicó en la investigación, la fórmula general para encontrar el caudal teórico en un vertedero con escotadura de tipo triangular está dada por:

$$Q_{teórico} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$$Q_{teórico} = m^3/s$$

$H=m$

Sustituyendo y realizando conversiones:

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(10/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

$$Q \text{ teórico} = 0.002067 H^{\frac{5}{2}}$$

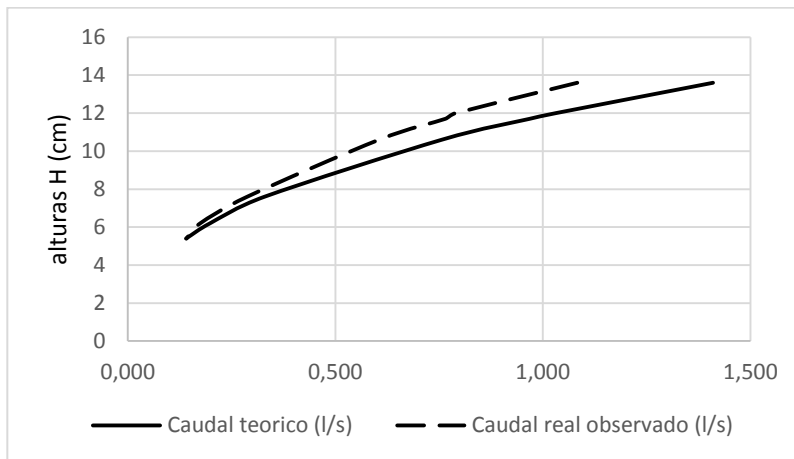
Donde:

$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$

$H = \text{cm}$

Teniendo en cuenta que los resultados para el caudal real observado se presentan en la tabla III, se muestran las curvas de descarga del caudal teórico y el caudal real observado en función de la altura  $H$ .

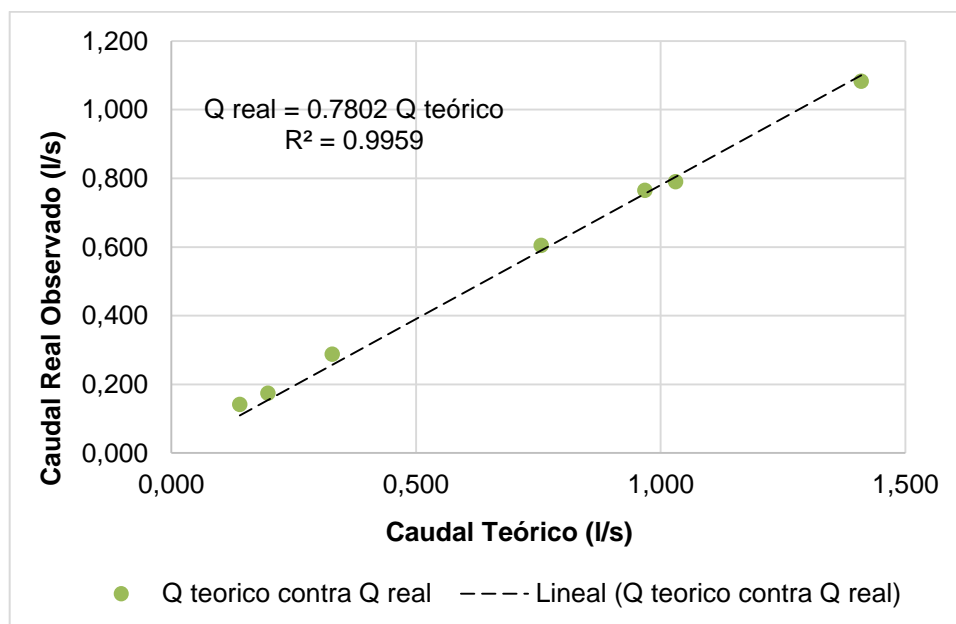
Figura 18. **Curvas de descarga VT-10°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Teniendo las curvas de descarga, para comparar gráficamente los resultados obtenidos, se presenta en el siguiente gráfico la relación entre el caudal teórico y el caudal real observado. Se observa que la correlación es lineal y la pendiente de dicha recta es el coeficiente de descarga.

Figura 19. **Obtención del coeficiente de descarga VT-10°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Por lo que se obtiene que el coeficiente de descarga para el vertedero triangular de 10° de abertura es de:

$$Cd = 0,7802$$

$$Q_{real} = 0,7802(0,002067 H^{\frac{5}{2}})$$

Para la obtención de la ecuación experimental es necesario realizar una regresión con el modelo potencial, la cual se define de la siguiente forma:

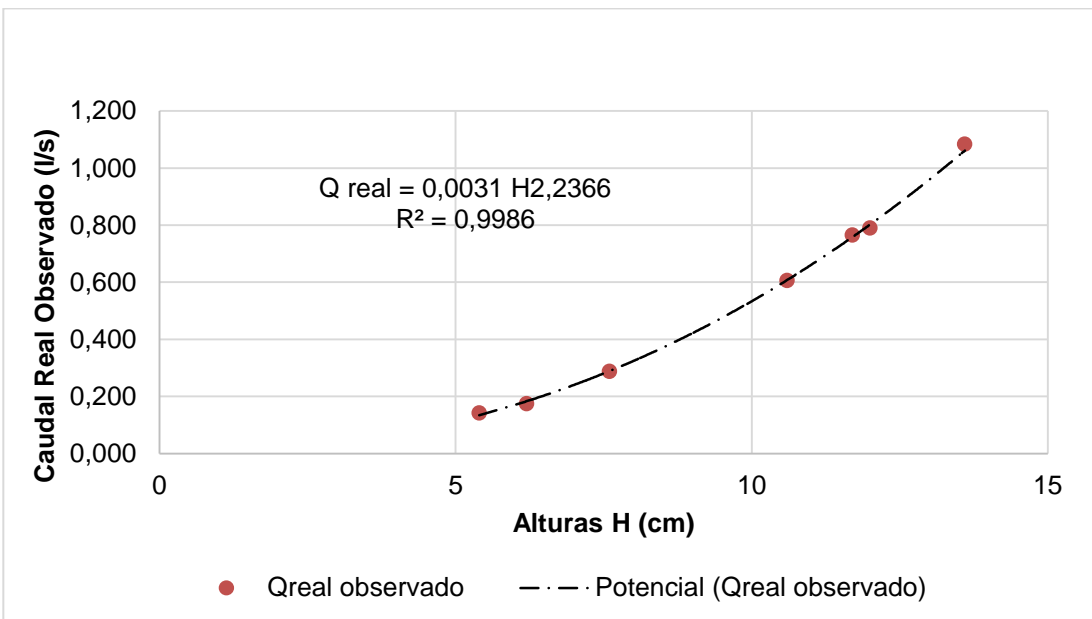
$$Q_{real} = K * H^n.$$

Donde:

K y n son coeficientes de correlación que genera el método de regresión potencial. Se utiliza el programa Excel para la obtención de dicha ecuación.

En el siguiente gráfico se presenta la relación caudal real observado *versus* altura H.

Figura 20. **Obtención de la ecuación experimental VT-10°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Del análisis de regresión se obtiene la ecuación experimental:

$$Q_{real} = 0,0031H^{2,2366}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Teniendo todos los datos necesarios se resumen, en la siguiente tabla, los resultados para el caudal real observado. El caudal generado con la ecuación calibrada y el caudal generado con la ecuación experimental respectivamente.

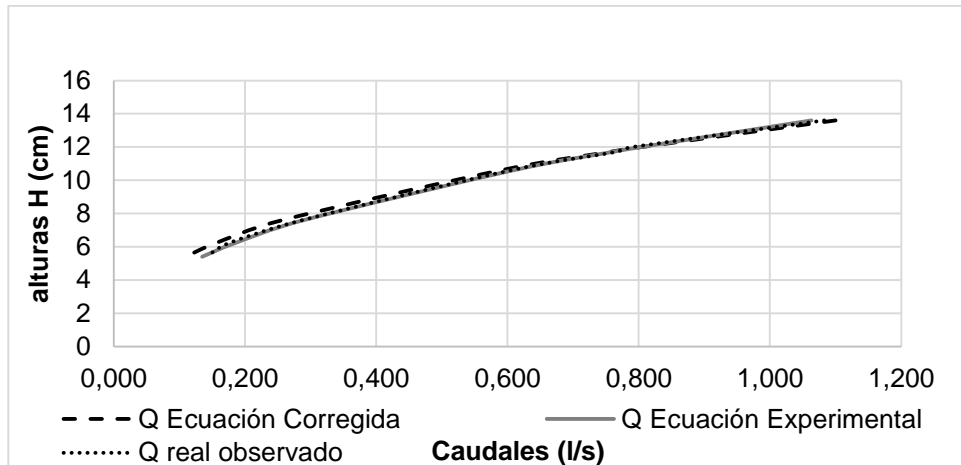
Tabla IV. **Relación de caudales VT-10°**

H (cm)	Qreal observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
13,6	1,083	1,100	1,5866	1,063	1,8077
12	0,790	0,804	1,8522	0,804	1,7488
11,7	0,765	0,755	1,2572	0,759	0,6974
10,6	0,605	0,590	2,4991	0,609	0,6371
7,6	0,287	0,257	10,6523	0,289	0,6683
6,2	0,174	0,154	11,4167	0,183	5,3056
5,4	0,141	0,109	22,5887	0,135	4,5651

Fuente: elaboración propia.

De la tabla IV se presenta el siguiente gráfico que relaciona los caudales obtenidos.

Figura 21. **Relación de caudales VT-10°**

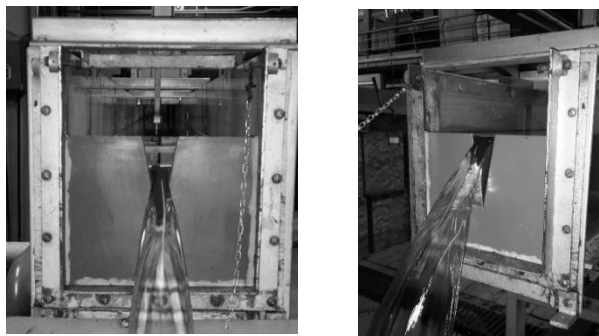


Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.2. **Calibración de vertedero triangular de 20° (VT-20°)**

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-20°.

Figura 22. **Vertedero triangular de 20° (VT-20°)**



Fuente: Vertedero VT-20°. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

Tabla V. **Datos obtenidos para el vertedero VT-20°**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
14,3	77,38	178,01	96,38	219,72	123,32	278,39
12,3	133,07	209,28	185,07	287,51	160,06	248,32
10,4	145,69	155,84	103,31	111,65	175,9	182,87
9,4	88,84	77,26	111,34	95,12	154,35	129,58
8,8	230,25	162,07	271,22	186,34	241,03	161,38
8,1	128,38	78,63	155,81	91,69	186,34	109,58
6,3	288,09	98,56	201,65	66,96	182,41	60,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Caudales reales observados VT-20°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
14,3	2,30	2,28	2,26	2,28
12,3	1,57	1,55	1,55	1,56
10,4	1,07	1,08	1,04	1,06
9,4	0,87	0,85	0,84	0,85
8,8	0,70	0,69	0,67	0,69
8,1	0,61	0,59	0,59	0,60

Fuente: elaboración propia.

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(20/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

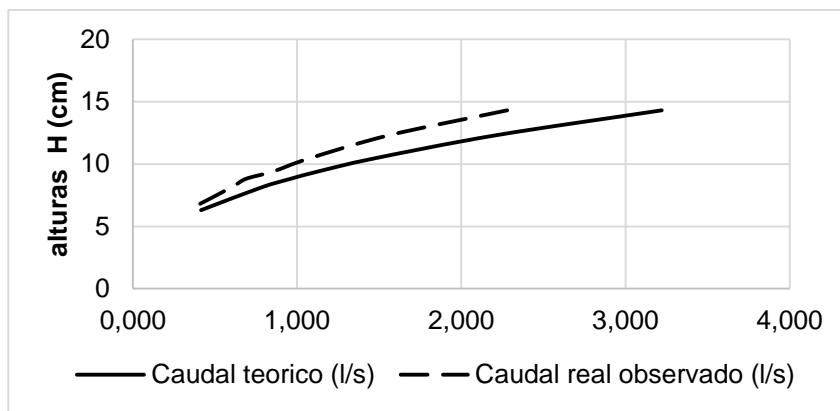
$$Q \text{ teórico} = 0,004165 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

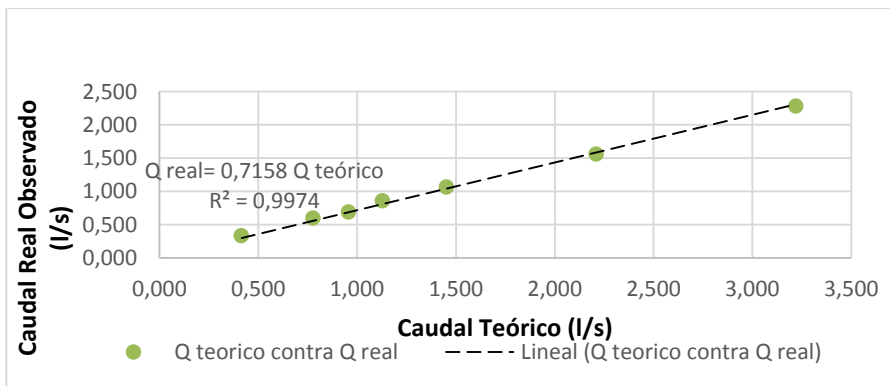
$H = cm$

Figura 23. **Curvas de descarga VT-20°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 24. **Obtención del coeficiente de descarga VT-20°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.



$$Cd = 0,7158$$

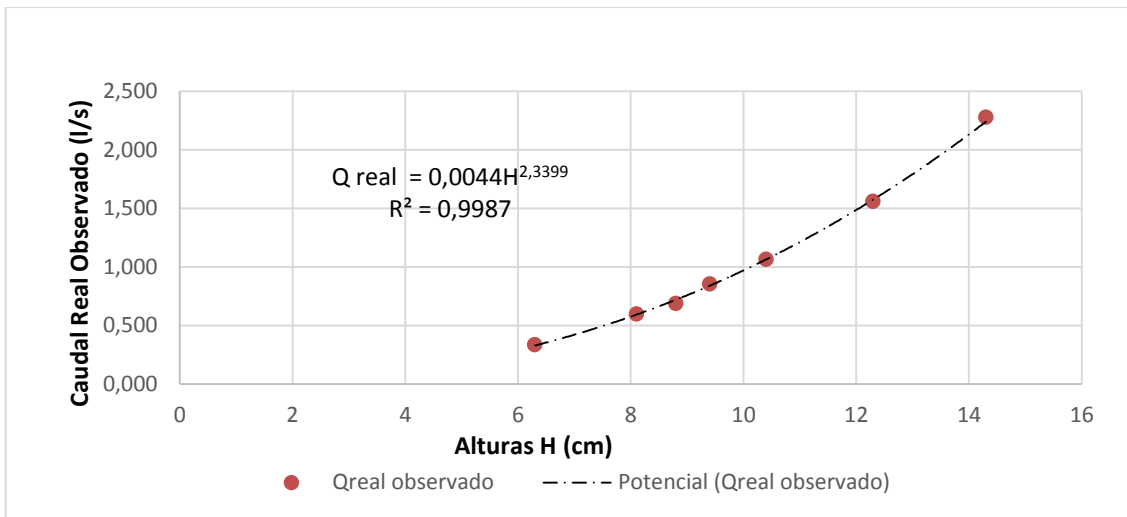
$$Q_{real} = 0,7158(0,004165 H^2)^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$$Q_{teórico} = l/s$$

$$H = cm$$

Figura 25. **Obtención de la ecuación experimental VT-20°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0044H^{2,3399}$$

Donde:

$$Q_{teórico} = l/s$$

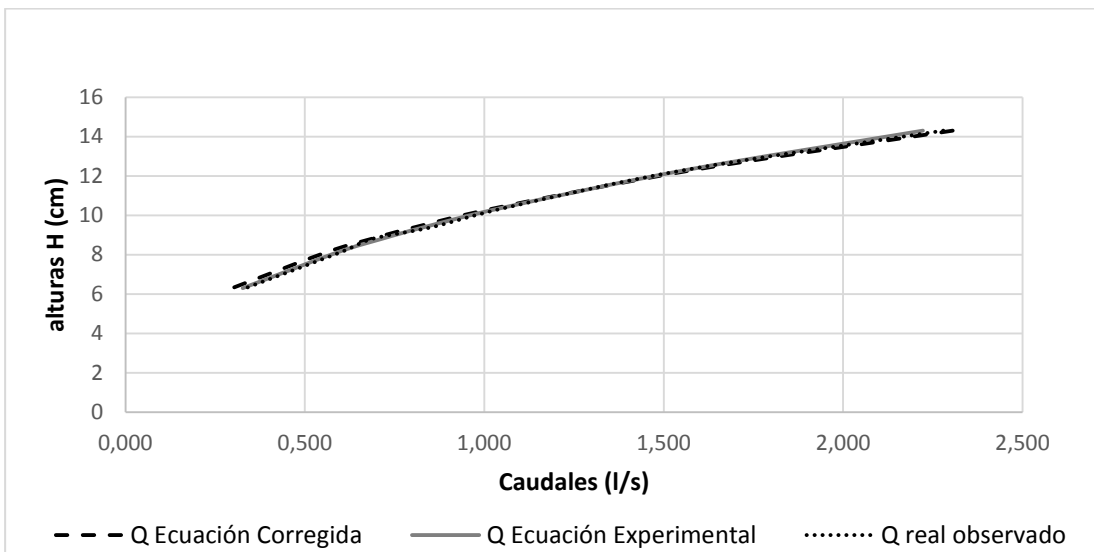
$$H = cm$$

Tabla VII. Relación de caudales VT-20°

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación Calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
14,3	2,279	2,305	1,1489	2,222	2,4926
12,3	1,559	1,582	1,4527	1,562	0,1880
10,4	1,063	1,040	2,2048	1,055	0,7943
9,4	0,854	0,808	5,4818	0,833	2,5541
8,8	0,687	0,685	0,2834	0,714	3,8967
8,1	0,596	0,557	6,6475	0,588	1,4348
6,3	0,335	0,297	11,2240	0,326	2,4186

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Relación de caudales VT-20°

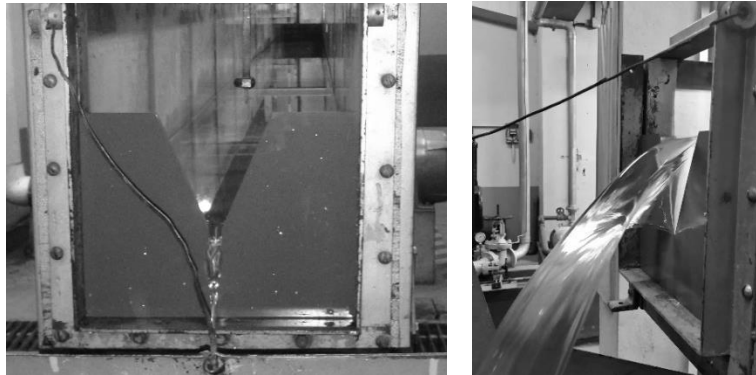


Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.3. Calibración de vertedero triangular de 30° (VT-30°)

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-30°.

Figura 27. Vertedero triangular de 30° (VT-30°)



Fuente: Vertedero VT-30°. Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.

Tabla VIII. Datos obtenidos para el vertedero VT-30°

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
14,3	38	126,13	46,06	150,31	58,28	187,73
13,2	49,03	132,34	82,69	219,02	98,31	258,8
11,8	67,97	140,63	87	175,93	121,18	242,03
10,1	135,19	189,12	148,85	203,71	174,06	235,75
9	170,34	180,1	185,12	192,59	229,56	235,75
6,3	281,38	132,34	307,82	137,17	211,41	95,12
4,5	444,12	87,56	533,12	92,37	608,75	101,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Caudales reales observados VT-30°**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
14,3	3,32	3,26	3,22	3,27
13,2	2,70	2,65	2,63	2,66
11,8	2,07	2,02	2,00	2,03
10,1	1,40	1,37	1,35	1,37
9	1,06	1,04	1,03	1,04
6,3	0,47	0,45	0,45	0,46
4,5	0,20	0,17	0,17	0,18

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2} * 981 \operatorname{tg}(30/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

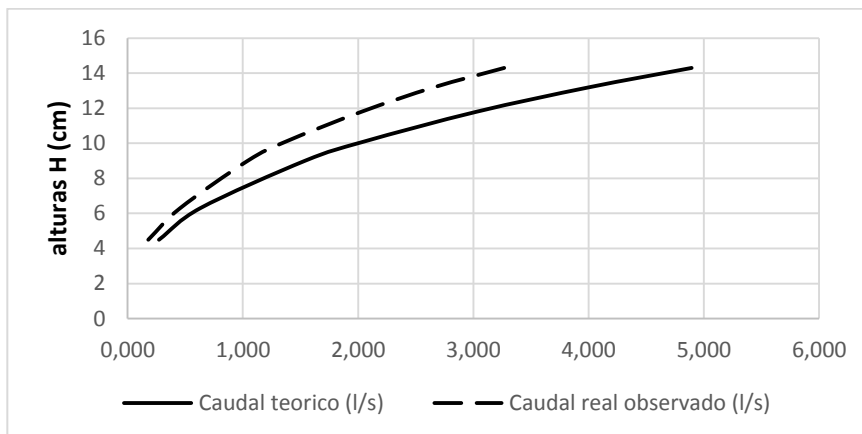
$$Q_{teórico} = 0,00633 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{teórico}$  = l/s

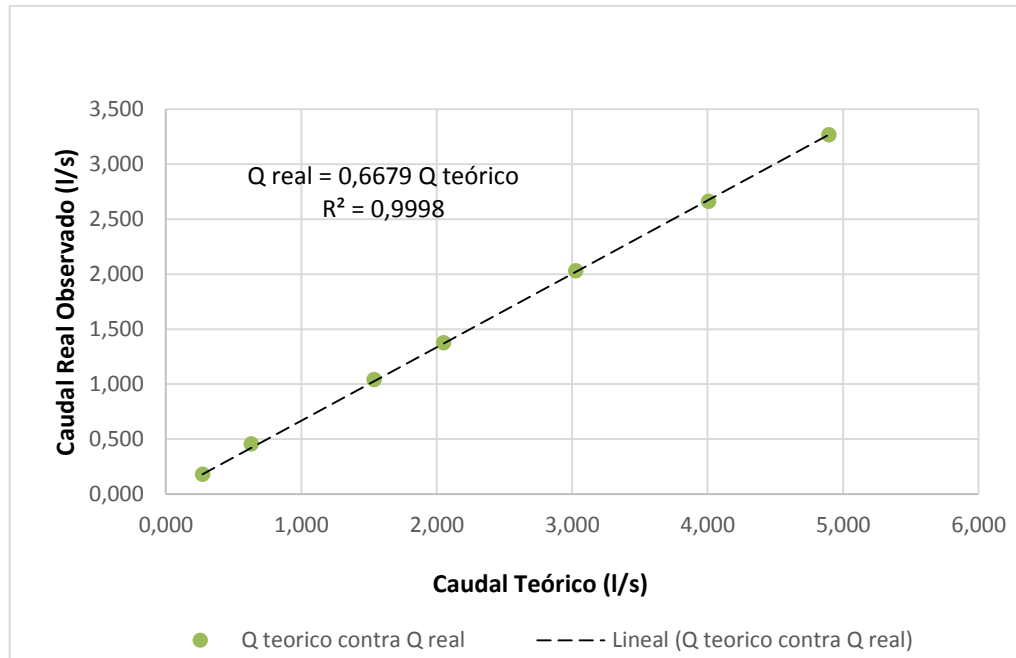
$H$  = cm

Figura 28. **Curvas de descarga VT-30°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 29. Obtención del coeficiente de descarga VT-30°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,6679$$

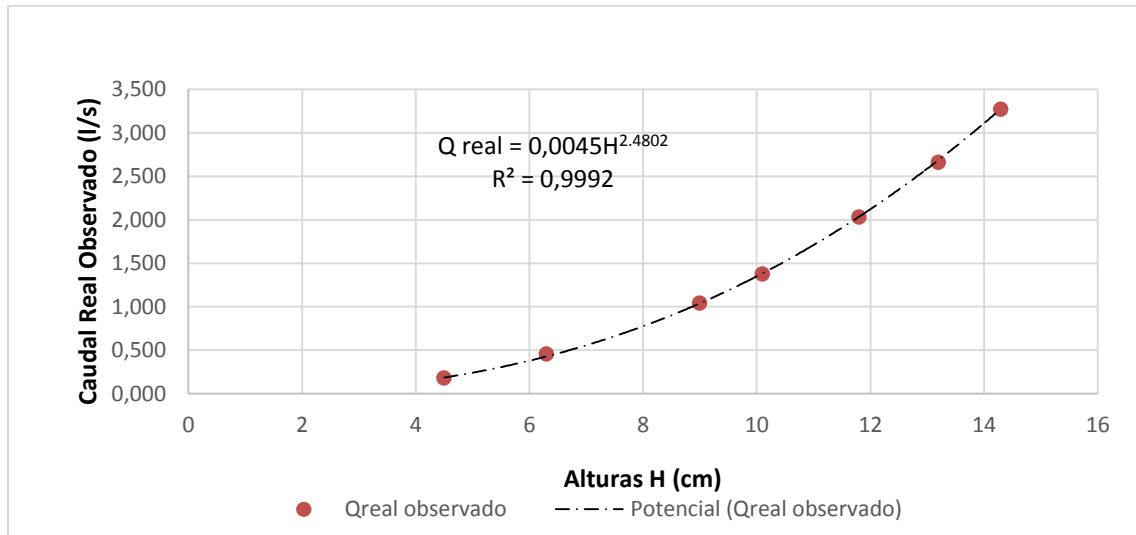
$$Q_{real} = 0,6679(0,00633 H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 30. Obtención de la ecuación experimental VT-30°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0045H^{2,4802}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

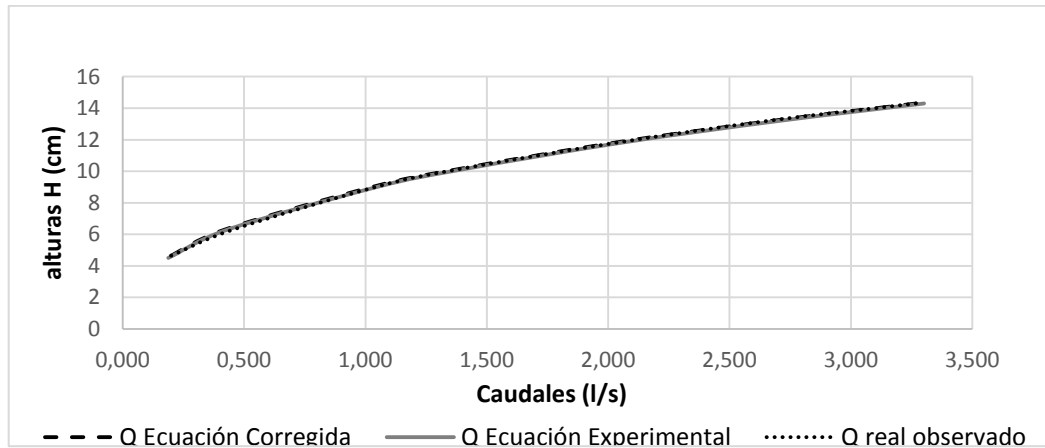
$H = cm$

Tabla X. Relación de caudales VT-30°

H (cm)	Q real observado (l/s)	V/t	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
14,3	3,268		3,269	0,0426	3,301	1,0198
13,2	2,660		2,676	0,6120	2,707	1,7559
11,8	2,029		2,022	0,3600	2,050	0,9969
10,1	1,374		1,371	0,2432	1,394	1,4272
9	1,042		1,027	1,3615	1,047	0,5193
6,3	0,455		0,421	7,4924	0,432	5,0604
4,5	0,179		0,182	1,4868	0,188	4,8512

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Relación de caudales VT-30°**

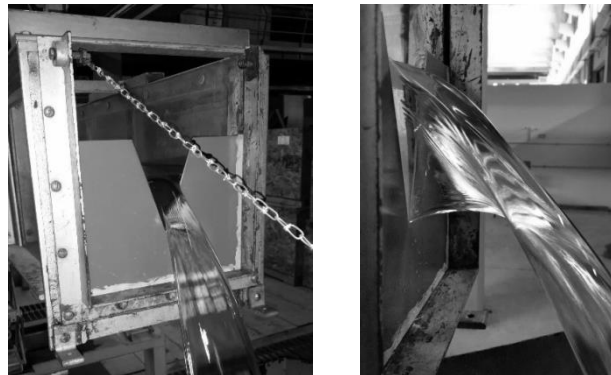


Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

#### 3.4.4. **Calibración de vertedero triangular de 40° (VT-40°)**

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-40°.

Figura 32. **Vertedero triangular de 40° (VT-40°)**



Fuente: Vertedero VT-40°. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

Tabla XI. **Datos obtenidos para el vertedero VT-40°**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
13,5	58,25	216,93	80,72	292,42	101	362,1
12,4	71,59	214,15	93,28	276,29	122,37	352,92
11	93,6	210,67	123,19	275,59	161,66	357,86
9,4	82,75	125,44	107,07	160	64,13	98,56
8	110,43	114,4	153,6	152,38	213,6	207,88
5,3	174,44	69,02	209,75	81,38	246,22	93,06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Caudales reales observados VT-40°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
13,5	3,72	3,62	3,59	3,64
12,4	2,99	2,96	2,88	2,95
11	2,25	2,24	2,21	2,23
9,4	1,52	1,49	1,54	1,52
8	1,04	0,99	0,97	1,00
5,3	0,40	0,39	0,38	0,39

Fuente: elaboración propia.

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(40/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

$$Q \text{ teórico} = 0,008599H^{\frac{5}{2}}$$

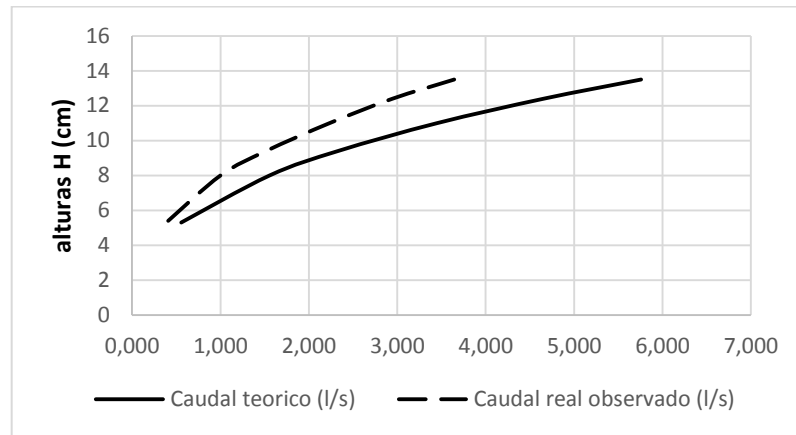


Dónde:

$$Q_{\text{teórico}} = l/s$$

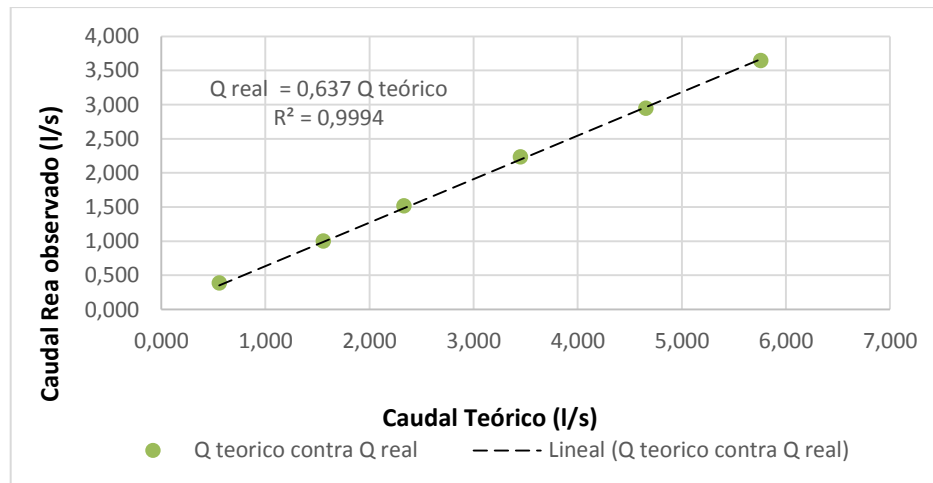
$$H = \text{cm}$$

Figura 33. **Curvas de descarga VT-40°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 34. **Obtención del coeficiente de descarga VT-40°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,637$$

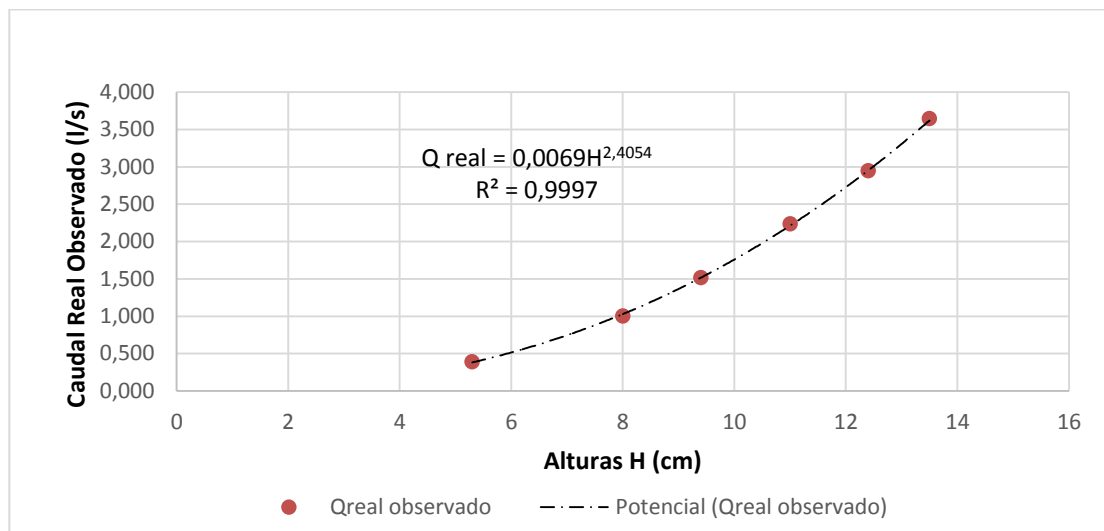
$$Q_{real} = 0,637(0,008599H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 35. Obtención de la ecuación experimental VT-40°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0069H^{2,4054}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

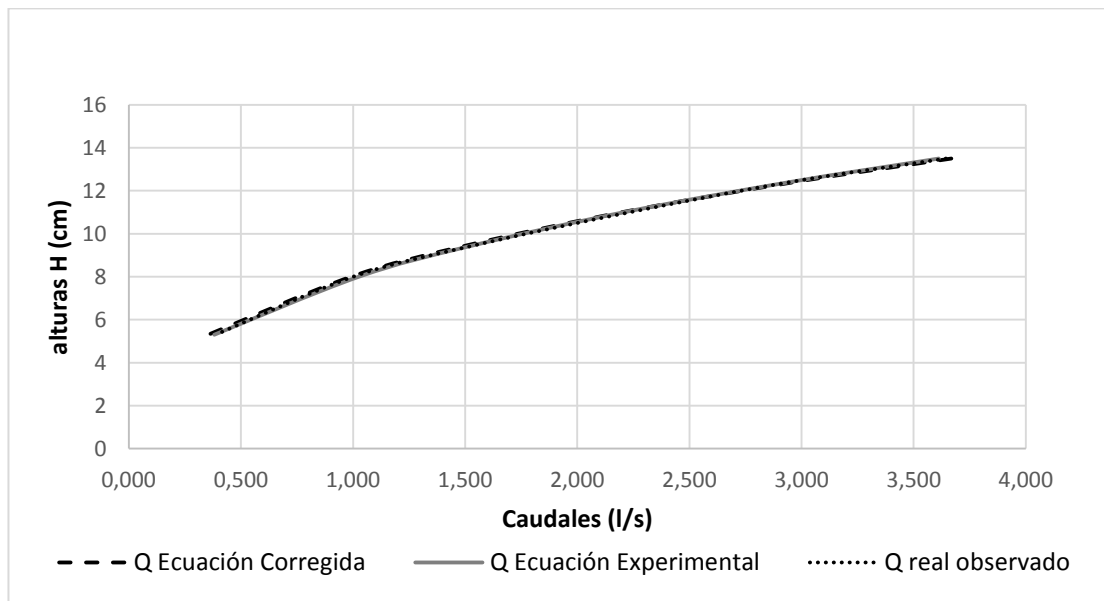
$H = cm$

Tabla XIII. Relación de caudales VT-40°

H (cm)	Q real observado (l/s)	V/t	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
13,5	3,644		3,668	0,6577	3,612	0,8760
12,4	2,946		2,966	0,6798	2,944	0,0538
11	2,234		2,198	1,5950	2,207	1,1986
9,4	1,516		1,484	2,0979	1,512	0,2310
8	1,000		0,992	0,8861	1,026	2,5567
5,3	0,387		0,354	8,5172	0,381	1,5797

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Relación de caudales VT-40°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.5. Calibración de vertedero triangular de 45° (VT-45°)

Seguido de los proceso de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-45°.

**Figura 37. Vertedero triangular de 45° (VT-45°)**



Fuente: Vertedero VT-45°. Laboratorio Hidráulica, FIUSAC.

**Tabla XIV. Datos obtenidos para el vertedero VT-45°**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
15,3	63,34	338,11	64,54	338,11	63,94	333.89
13,7	48,38	200,23	48,59	200,23	48,25	196.06
12,3	63,78	198,84	65,72	196,06	64,53	196.06
11,4	77,04	203,71	78,13	199,54	80,09	201.63
10,9	86,41	196,09	88,06	198,84	87,6	197.45
8,8	70,13	95,81	73,35	98,56	72,35	97.88
5,1	190,53	71,08	193,35	66,28	196,53	62.16

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Caudales reales observados VT-45°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
15,3	5,34	5,24	5,22	5,27
13,7	4,14	4,12	4,06	4,11
12,3	3,12	2,98	3,04	3,05
11,4	2,64	2,55	2,52	2,57
10,9	2,27	2,26	2,25	2,26
8,8	1,37	1,34	1,35	1,35
5,1	0,37	0,34	0,32	0,34

Fuente: elaboración propia.

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(45/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

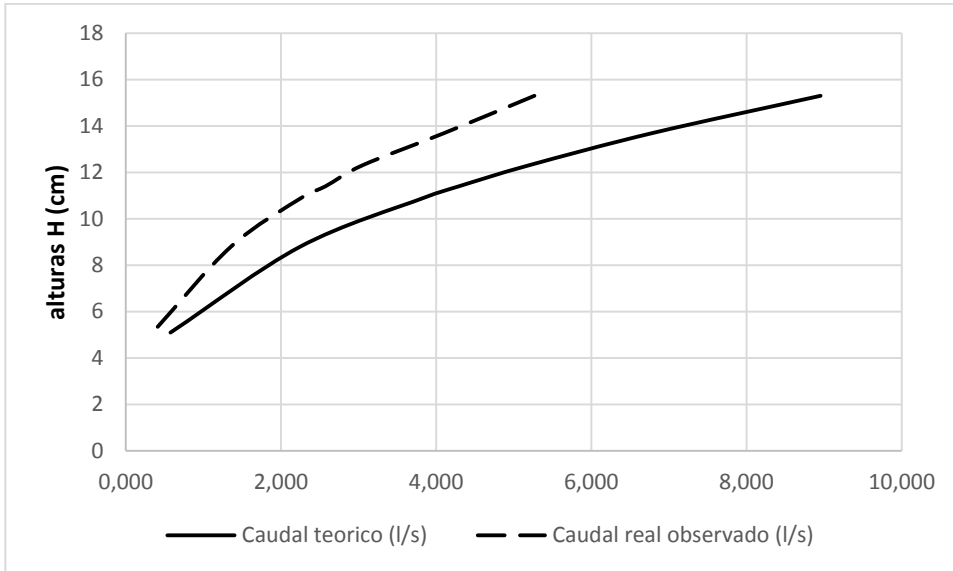
$$Q \text{ teórico} = 0,00978 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$

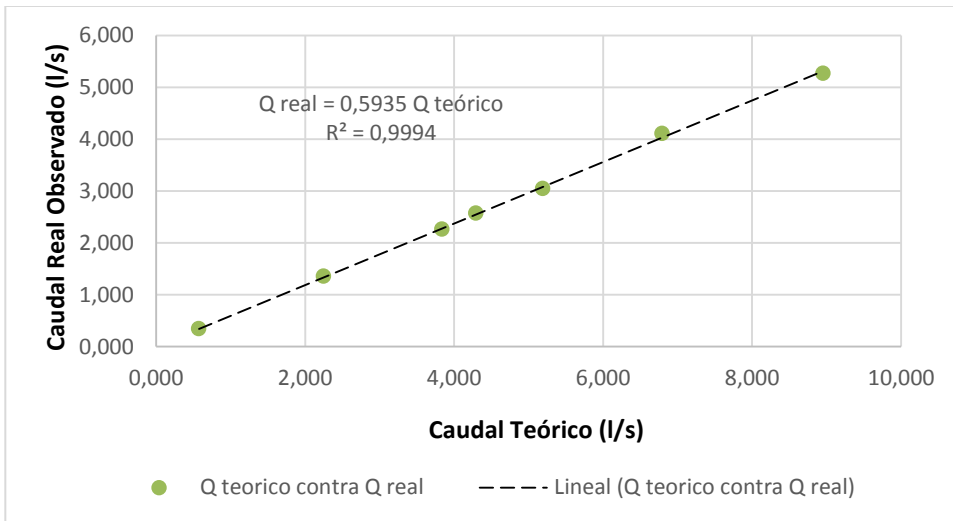
$H = \text{cm}$

Figura 38. **Curvas de descarga VT-45°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 39. **Obtención del coeficiente de descarga VT-45°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,5935$$

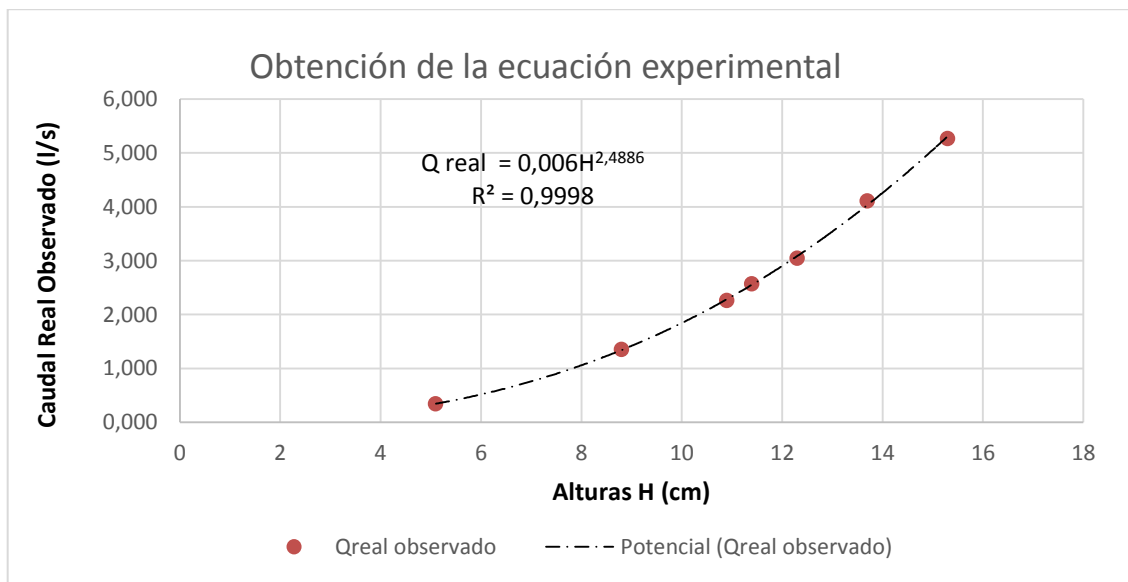
$$Q_{real} = 0,5935(0,00978H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 40. **Obtención de la ecuación experimental VT-45°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,006H^{2,4886}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

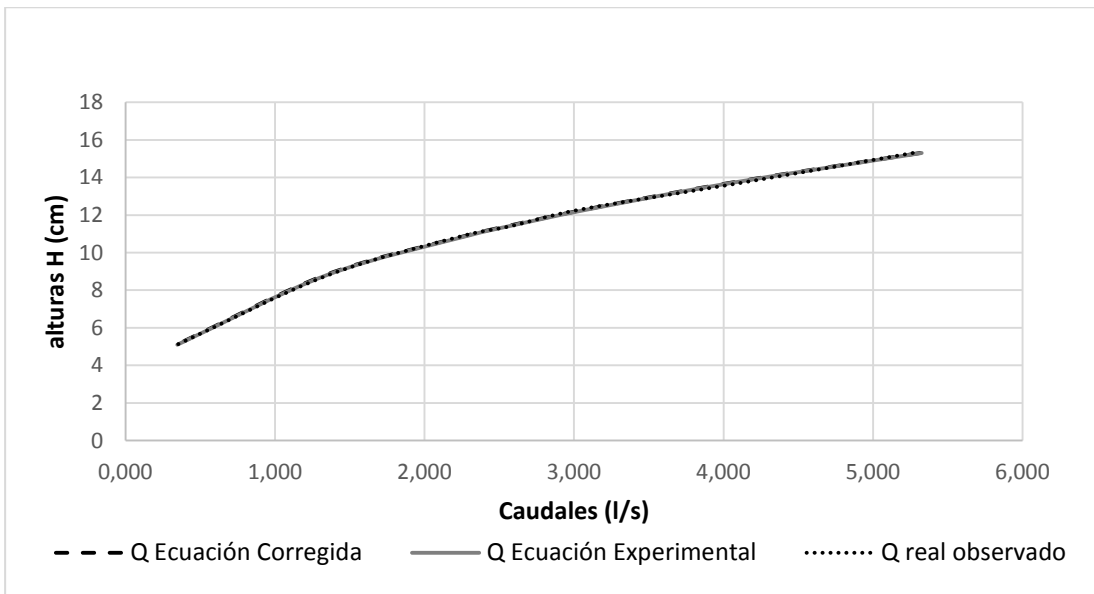
$H = cm$

Tabla XVI. Relación de caudales VT-45°

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
15,3	5,266	5,315	0,9224	5,326	1,1286
13,7	4,108	4,032	1,8323	4,046	1,5078
12,3	3,046	3,080	1,0971	3,094	1,5560
11,4	2,572	2,547	0,9698	2,561	0,4341
10,9	2,260	2,277	0,7243	2,290	1,3209
8,8	1,354	1,333	1,5380	1,345	0,7128
5,1	0,344	0,341	0,9023	0,346	0,5515

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Relación de caudales VT-45°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.



### 3.4.6. Calibración de vertedero triangular de 50° (VT-50°)

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-50°.

Figura 42. Vertedero triangular de 50° (VT-50°)



Fuente: Vertedero VT-50°. Laboratorio Hidráulica, FIUSAC.

Tabla XVII. Datos obtenidos para el vertedero VT-50°

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
14,1	40,28	220,42	31,53	172,47	54,94	299,43
12,1	56,63	209,28	78,4	288,91	97,13	352,22
8,4	128,5	195,37	90,31	137,86	162,22	242,73
7,3	80,68	92,37	140,97	152,38	183,97	193,98
5,1	138,19	73,14	205,97	99,25	171,12	79,32
3	471,25	71,08	574,47	73,52	636,09	76,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Caudales reales observados VT-50°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
14,1	5,47	5,47	5,45	5,46
12,1	3,70	3,69	3,63	3,67
8,4	1,52	1,53	1,50	1,51
7,3	1,14	1,08	1,05	1,09
5,1	0,53	0,48	0,46	0,49

Fuente: elaboración propia.

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(50/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

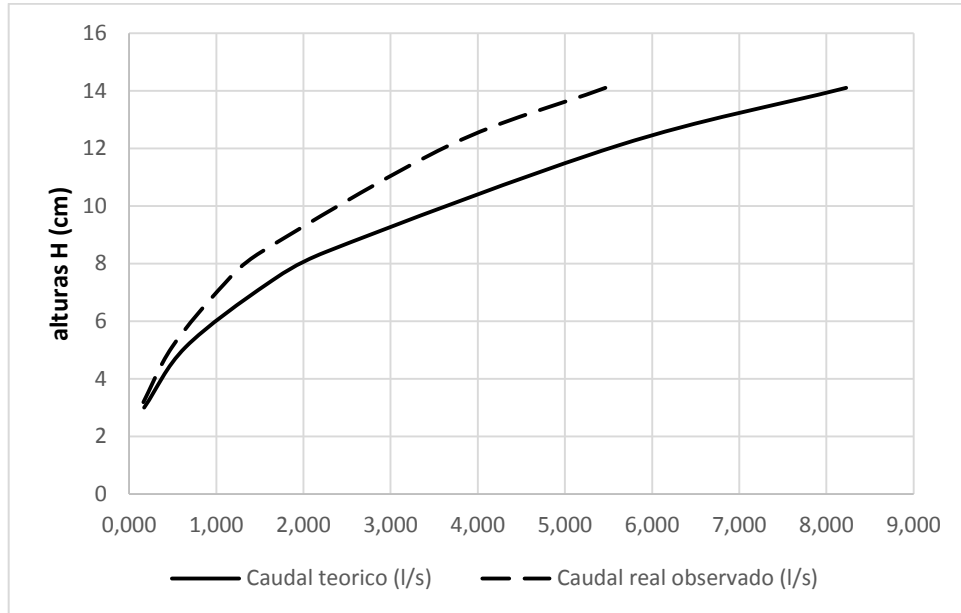
$$Q \text{ teórico} = 0,01102H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$

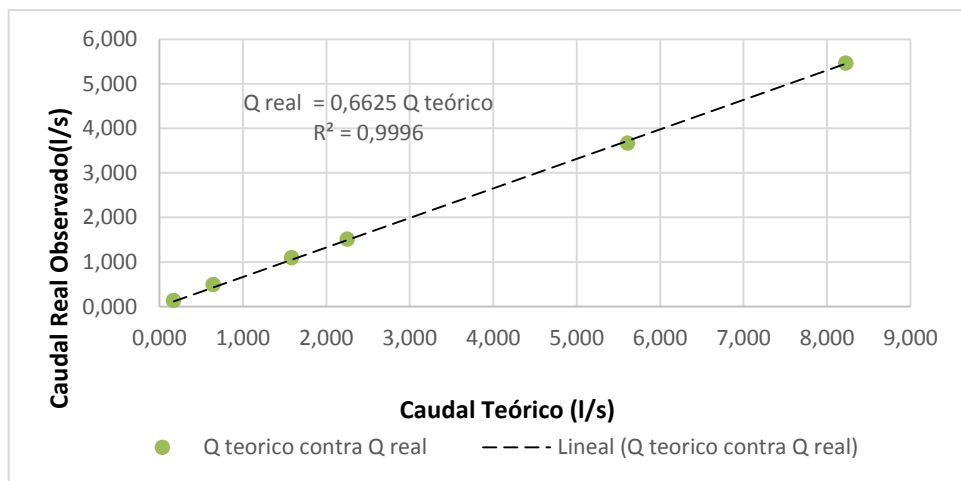
$H = \text{cm}$

Figura 43. **Curvas de descarga VT-50°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 44. **Obtención del coeficiente de descarga VT-50°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,6625$$

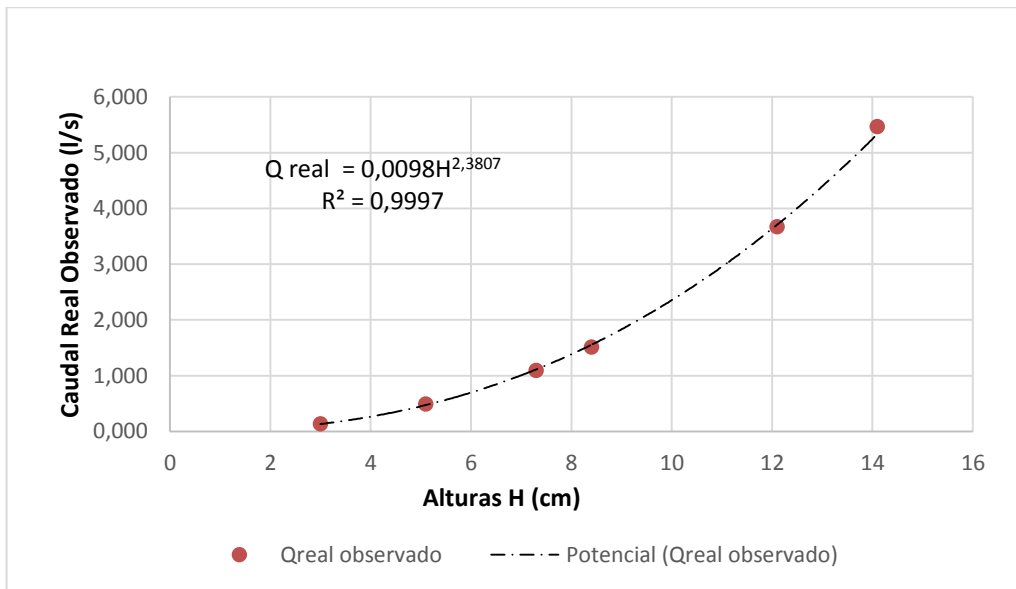
$$Q_{real} = 0,6625(0,01102H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 45. **Obtención de la ecuación experimental VT-50°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0098H^{2,3807}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

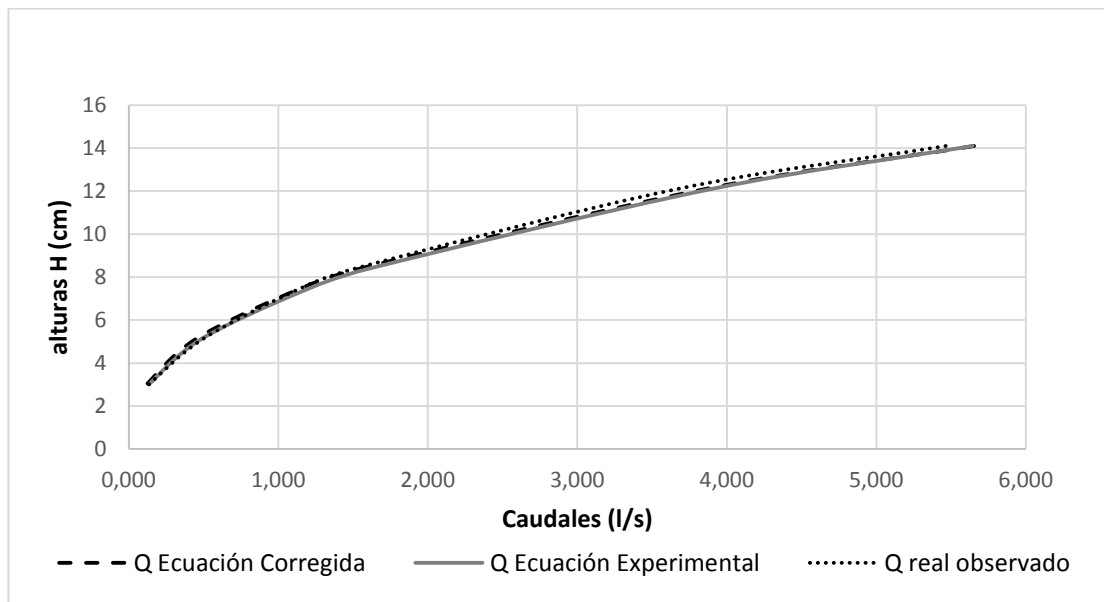
$H = cm$

Tabla XIX. Relación de caudales VT-50°

H (cm)	Q real observado (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
14,1	5,464	5,654	3,4798	5,645	3,3099
12,1	3,669	3,857	5,1349	3,897	6,2253
8,4	1,514	1,549	2,2786	1,610	6,3313
7,3	1,093	1,091	0,2644	1,146	4,8319
5,1	0,492	0,445	9,4936	0,481	2,1632
3	0,133	0,118	11,2691	0,133	0,0186

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Relación de caudales VT-50°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.7. Calibración de vertedero triangular de 60° (VT-60°)

Seguido de los proceso de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-60°.

Figura 47. Vertedero triangular de 60° (VT-60°)



Fuente: Vertedero VT-60°. Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.

Tabla XX. Datos obtenidos para el vertedero VT-60°

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
14	52,09	347,98	42,37	286,1	35,32	237,84
12,4	57,69	287,51	67,91	334,59	71,47	348,69
11,1	67,06	254,6	75,41	285,4	54,88	207,88
9	103,69	233,66	119,72	263,69	142,9	315,29
7,2	166,22	228,78	180,5	242,03	120,06	160
5	122,5	75,2	150,75	88,94	181,53	101,32
3,6	260,81	66,28	280,19	68,33	309,65	75,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Caudales reales observados VT-60°

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
14	6,68	6,75	6,73	6,72
12,4	4,98	4,93	4,88	4,93
11,1	3,80	3,78	3,79	3,79
9	2,25	2,20	2,21	2,22
7,2	1,38	1,34	1,33	1,35
5	0,61	0,59	0,56	0,59
3,6	0,25	0,24	0,25	0,25

Fuente: elaboración propia.

$$Q \text{ teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(60/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

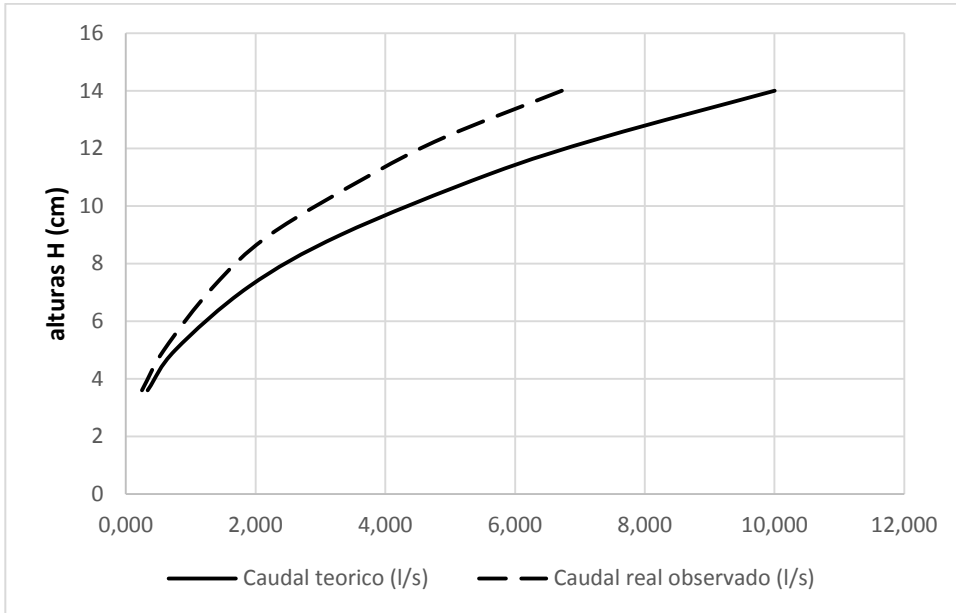
$$Q \text{ teórico} = 0,01364 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$

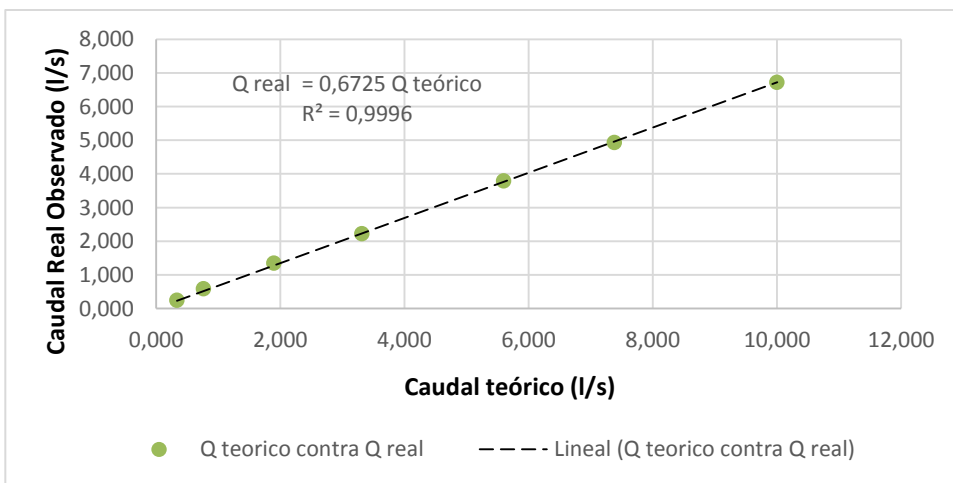
$H = \text{cm}$

Figura 48. **Curvas de descarga VT-60°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 49. **Obtención del coeficiente de descarga VT-60°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.



$$Cd = 0,6725$$

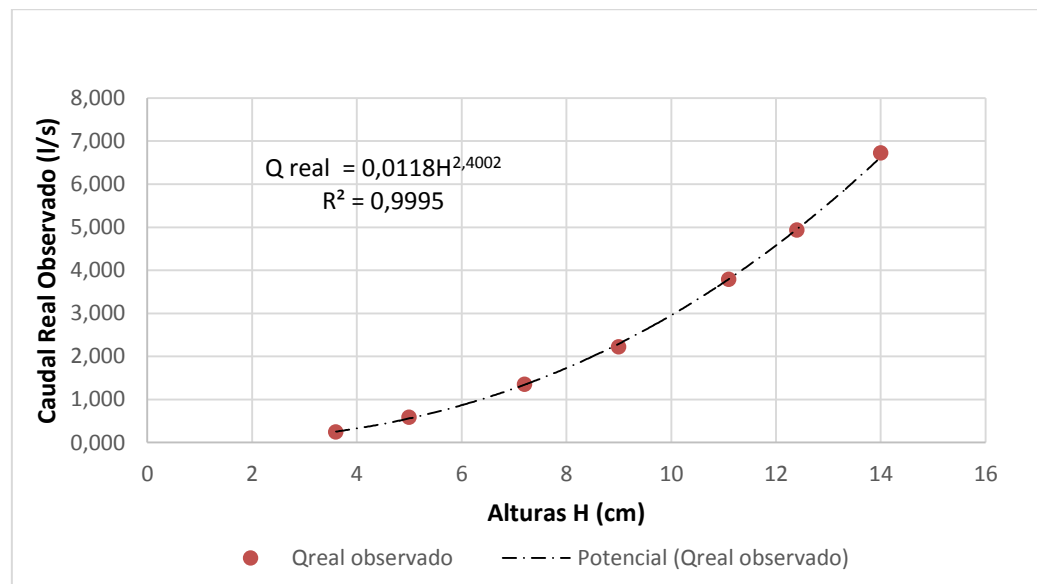
$$Q_{real} = 0,6725(0,01364H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 50. **Obtención de la ecuación de descarga VT-60°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0118H^{2,4002}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

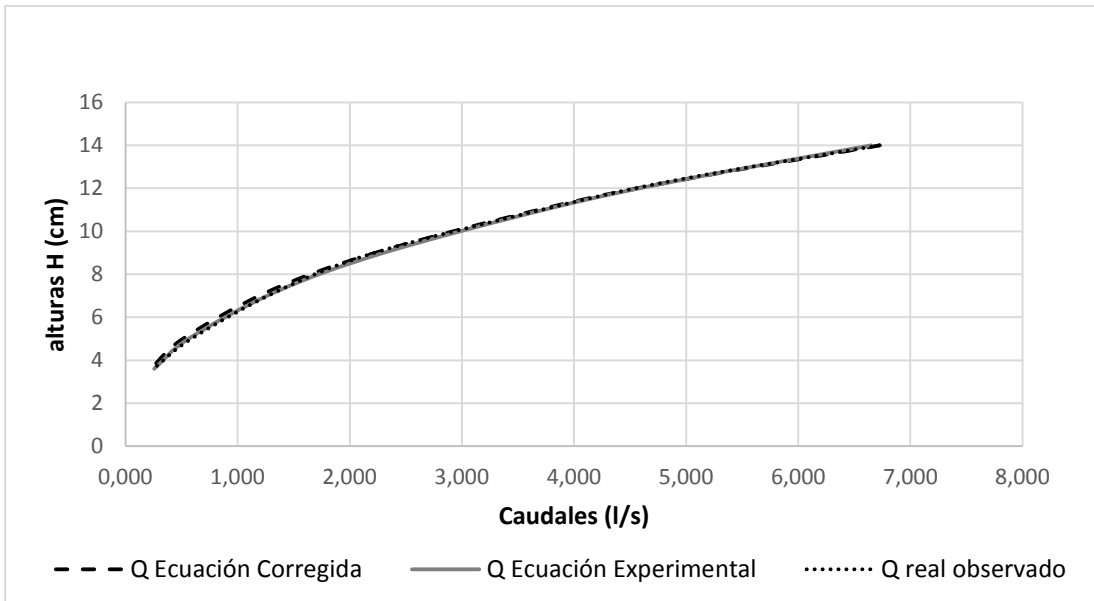
$H = c$

Tabla XXII. Relación de caudales VT-60°

H (cm)	Q real observado (l/s)	V/t	Q ecuación Calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
14	6,722		6,727	0,0724	6,650	1,0750
12,4	4,930		4,967	0,7462	4,970	0,8046
11,1	3,790		3,765	0,6409	3,809	0,5217
9	2,221		2,229	0,3703	2,303	3,6925
7,2	1,350		1,276	5,4824	1,348	0,1551
5	0,587		0,513	12,6937	0,562	4,3547
3,6	0,248		0,226	8,9322	0,255	3,0911

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Relación de caudales VT-60°

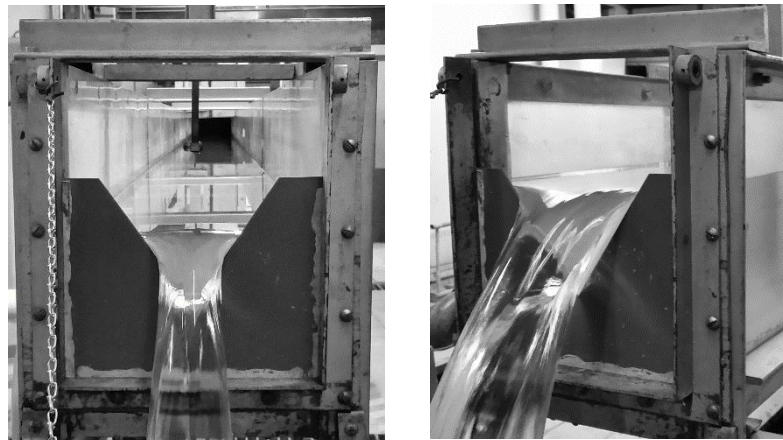


Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.8. Calibración de vertedero triangular de 70° (VT-70°)

Seguido de los proceso de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-70°.

Figura 52. Vertedero triangular de 70° (VT-70°)



Fuente: Vertedero VT-70°. Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.

Tabla XXIII. Datos obtenidos para el vertedero VT-70°

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
13,2	29,28	214,84	44,32	315,59	55	384,02
12,3	35,32	214,84	52,56	317	62,72	373,41
10,8	48,32	218,33	59,59	269,29	83,25	369,87
9,9	67,37	239,94	65,56	231,57	105,07	364,92
7,9	116,25	242,73	139,06	286,1	162,78	330,37
5,5	123,66	113,02	174,47	156,53	221,53	193,98
2,7	261,31	62,85	304,1	63,53	366,25	71,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Caudales reales observados VT-70°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
13,2	7,34	7,12	6,98	7,15
12,3	6,08	6,03	5,95	6,02
10,8	4,52	4,52	4,44	4,49
9,9	3,56	3,53	3,47	3,52
7,9	2,09	2,06	2,03	2,06
5,5	0,91	0,90	0,88	0,90
2,7	0,24	0,21	0,19	0,21

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(70/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

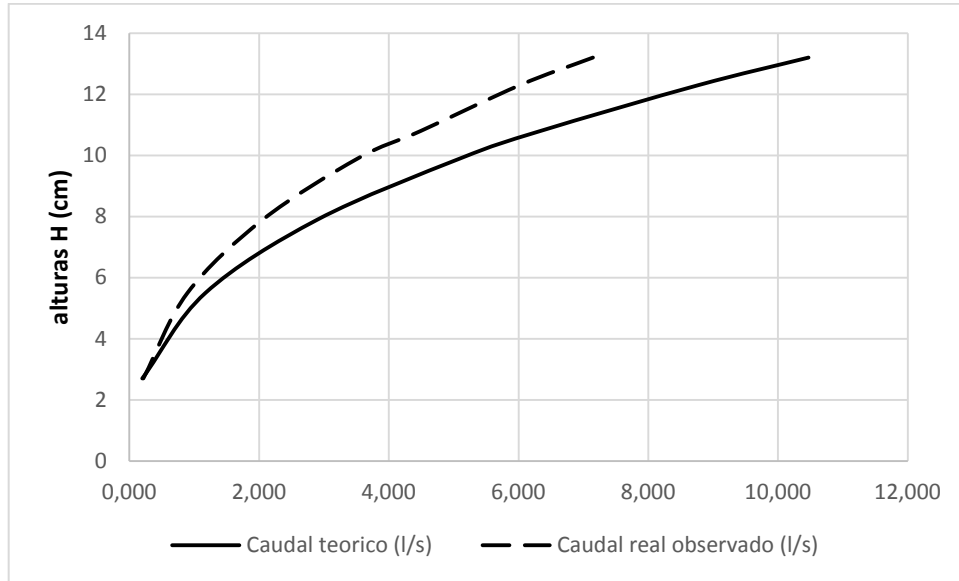
$$Q_{teórico} = 0,01654H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

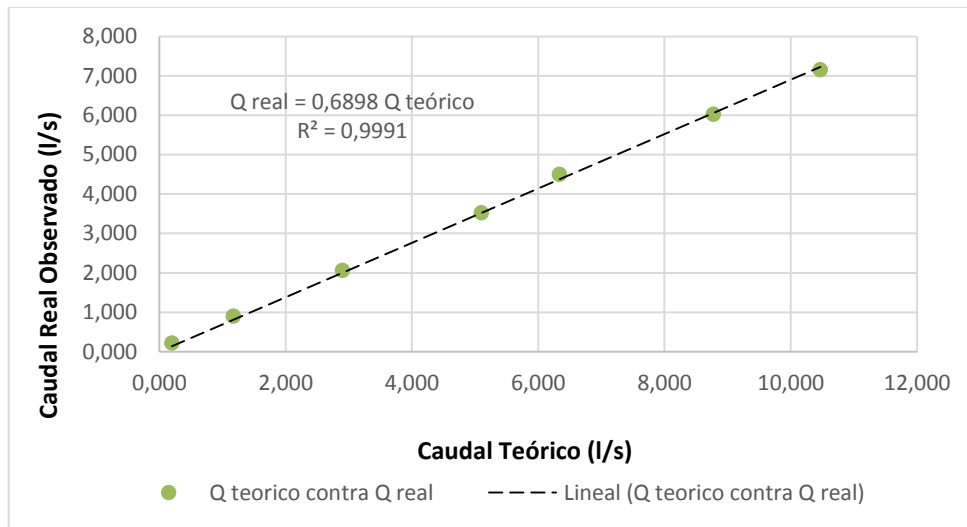
$H = cm$

Figura 53. **Curvas de descarga VT-70°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 54. **Obtención de la ecuación de descarga VT-70°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,6898$$

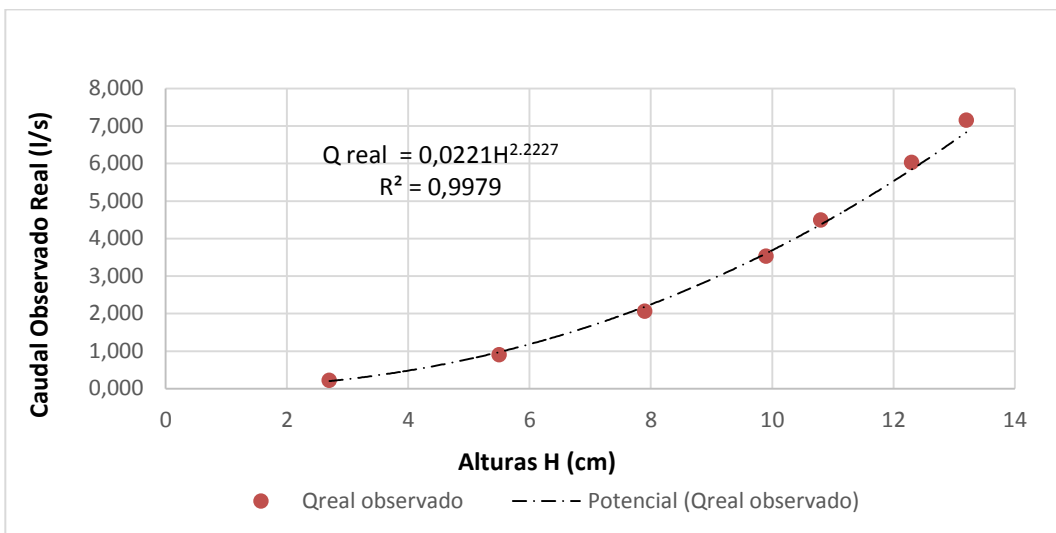
$$Q_{real} = 0,6898(0,01654H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$$Q_{teórico} = l/s$$

$$H = cm$$

Figura 55. Obtención de la ecuación experimental VT-70°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0221H^{2,2227}$$

Donde:

$$Q_{teórico} = l/s$$

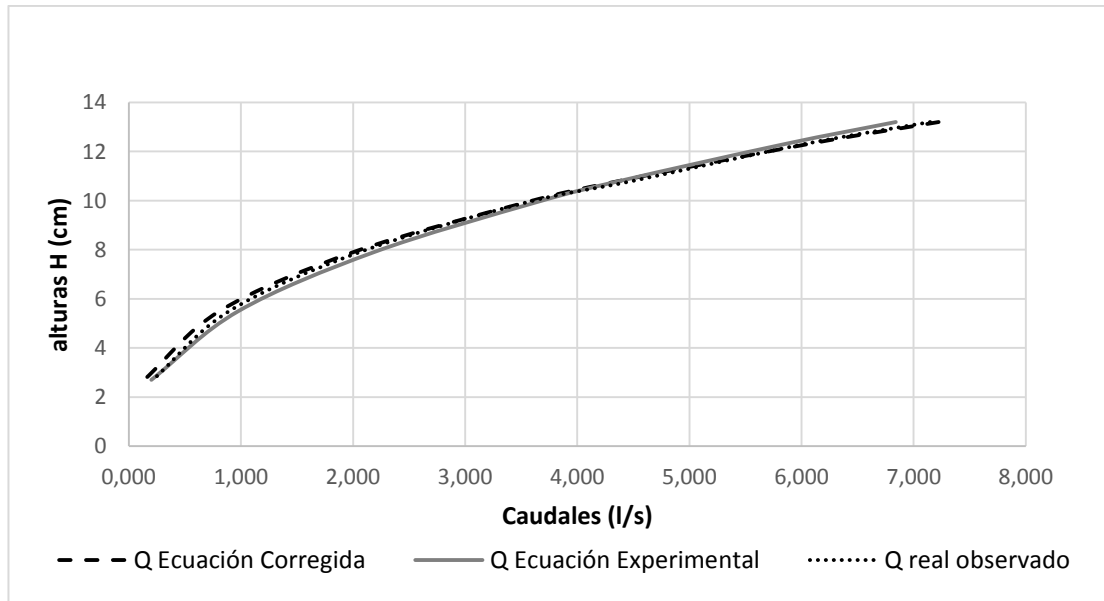
$$H = cm$$

Tabla XXV. Relación de caudales VT-70°

H (cm)	Qreal observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
13,2	7,147	7,223	1,0610	6,841	4,28460179
12,3	6,022	6,054	0,5183	5,847	2,9159078
10,8	4,493	4,373	2,6719	4,379	2,54516572
9,9	3,522	3,518	0,1097	3,609	2,4630854
7,9	2,058	2,001	2,7666	2,185	6,178581
5,5	0,896	0,809	9,6233	0,977	9,11570498
2,7	0,215	0,137	36,2857	0,201	6,29700569

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Relación de caudales VT-70°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.9. Calibración de vertedero triangular de 80° (VT-80°)

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-80°.

Figura 57. **Vertedero triangular de 80° (VT-80°)**



Fuente: Vertedero VT-80°. *Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.*

Tabla XXVI. **Datos obtenidos para el vertedero VT-80°**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
13,2	33,38	281,2	39,41	328,96	39,38	328,25
12,5	37,65	272,09	43,91	318,4	37,97	273,49
11,7	52,5	321,92	61,38	373,41	67,87	409,53
10,8	88,25	440,79	56,66	286,1	65,25	326,85
9,3	60,1	211,36	84,29	293,82	111,03	382,6
7,8	102,97	233,66	133	298,03	151	330,37
5,2	256,93	224,6	366,44	308,56	443,5	364,22

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXVII. Caudales reales observados VT-80°

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
13,2	7,34	7,12	6,98	7,15
12,3	6,08	6,03	5,95	6,02
10,8	4,52	4,52	4,44	4,49
9,9	3,56	3,53	3,47	3,52
7,9	2,09	2,06	2,03	2,06
5,5	0,91	0,90	0,88	0,90
2,7	0,24	0,21	0,19	0,21

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{\text{teórico}} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(80/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

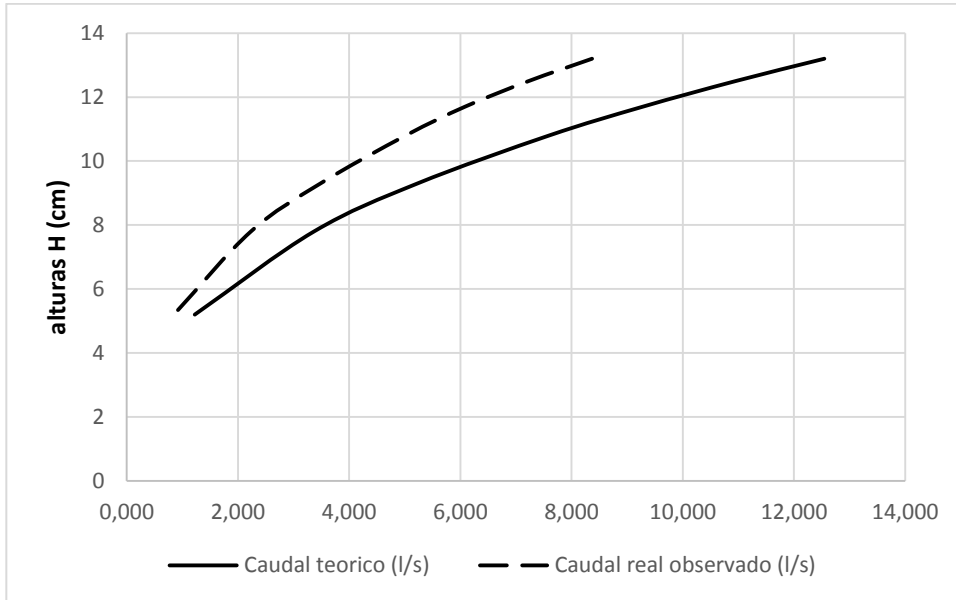
$$Q_{\text{teórico}} = 0,01982 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$

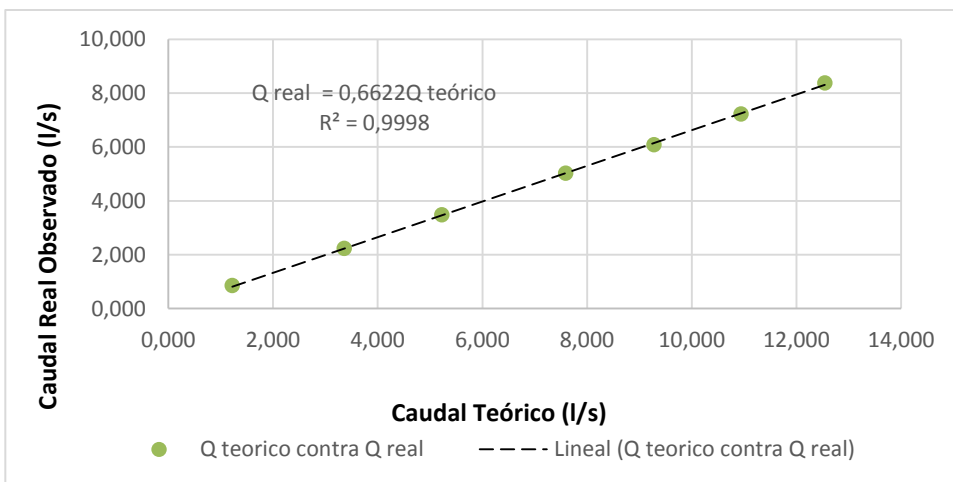
$H = \text{cm}$

Figura 58. **Curvas de descarga VT-80°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 59. **Obtención del coeficiente de descarga VT-80°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,6622$$

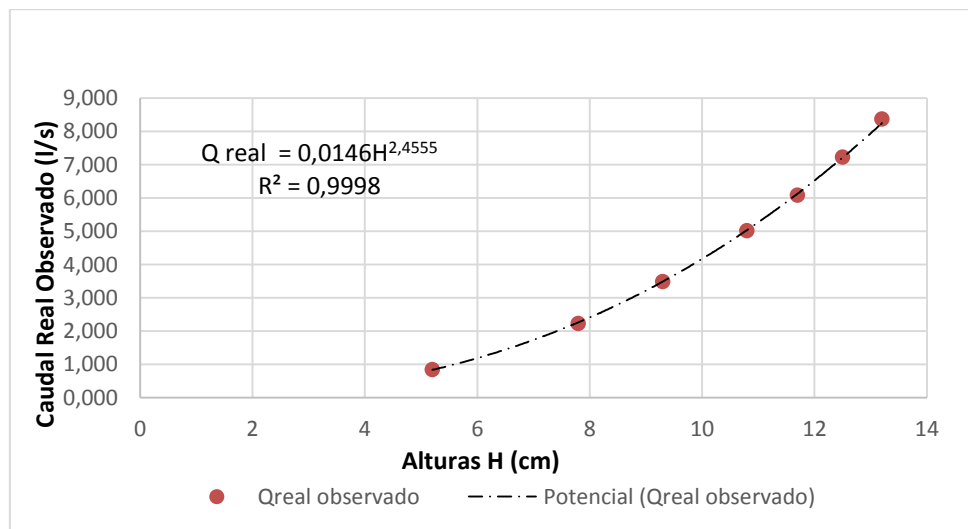
$$Q_{real} = 0,6622(0,01982H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 60. **Obtención de la ecuación experimental VT-80°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0146H^{2,4555}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

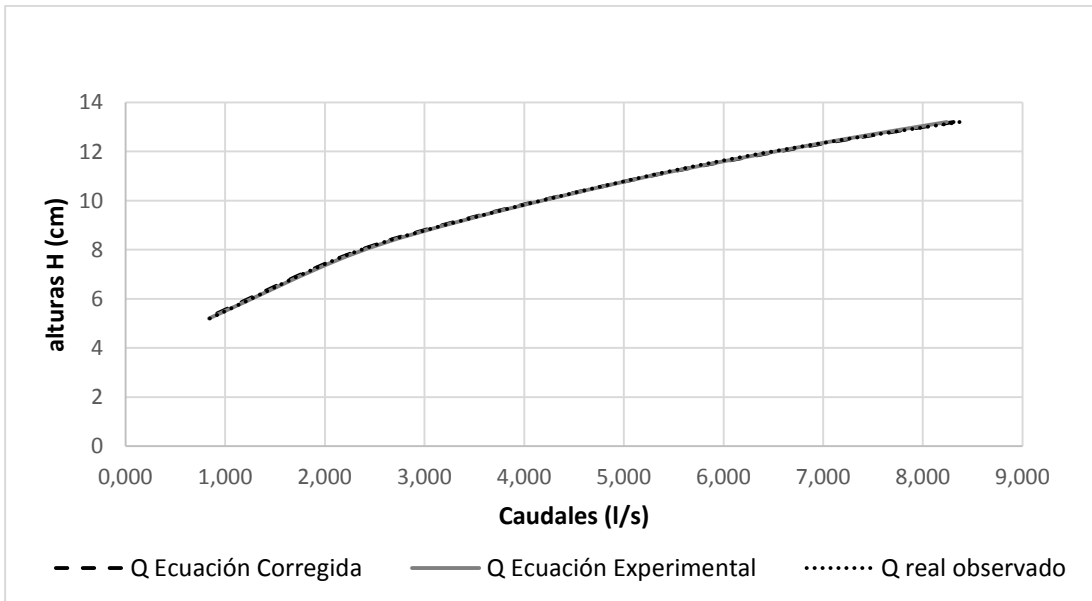
$H = cm$

Tabla XXVIII. Relación de caudales VT-80°

H (cm)	Q <sub>real observado</sub> V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
13,2	8,369	8,309	0,7209	8,240	1,5417
12,5	7,227	7,250	0,3260	7,208	0,2619
11,7	6,083	6,146	1,0252	6,127	0,7292
10,8	5,018	5,031	0,2626	5,034	0,3255
9,3	3,483	3,462	0,6047	3,487	0,1217
7,8	2,233	2,230	0,1125	2,264	1,4082
5,2	0,846	0,809	4,3194	0,837	1,0942

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Relación de caudales VT-80°

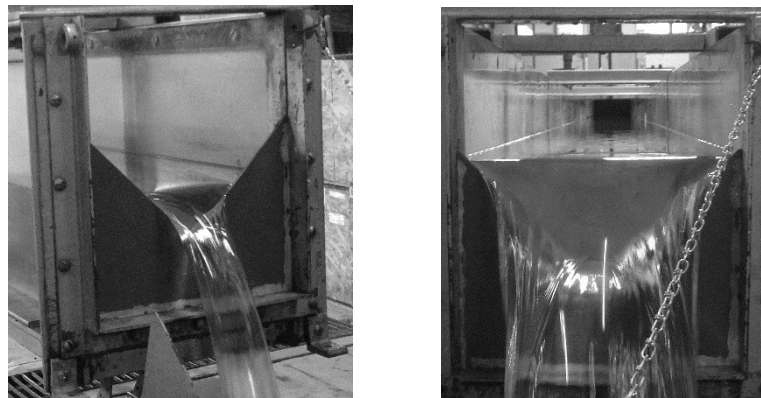


Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.4.10. Calibración de vertedero triangular de 90° (VT-90°)

Seguido de los procesos de diseño se presentan a continuación los datos obtenidos, los cálculos y los resultados respectivos para el coeficiente de descarga del vertedero VT-90°.

Figura 62. Vertedero triangular de 90° (VT-90°)



Fuente: Vertedero VT-90°. Laboratorio de Hidráulica, FIUSAC.

Tabla XXIX. Datos obtenidos para el vertedero VT-90°

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
11,2	16,94	115,78	30,69	201,63	41,29	269,29
9	34,03	133,03	48,56	185,65	63,97	239,94
8,6	28	98,56	39,34	139,25	54,37	192,45
7,6	35,63	93,75	52,66	137,86	76,28	197,45
7,1	77,94	174,55	47,91	99,94	81,84	162,77
5,4	108,97	126,13	113,72	127,51	144,62	160
3,9	153,79	86,19	185,53	94,44	182	91,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Caudales reales observados VT-90°**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
11,2	6,83	6,57	6,52	6,64
9	3,91	3,82	3,75	3,83
8,6	3,52	3,54	3,54	3,53
7,6	2,63	2,62	2,59	2,61
7,1	2,24	2,09	1,99	2,10
5,4	1,16	1,12	1,11	1,13
3,9	0,56	0,51	0,50	0,52

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{teórico} = \left[ \left( \frac{8}{15} \sqrt{2 * 981} \operatorname{tg}(90/2) \right) / 1000 \right] H^{\frac{5}{2}}$$

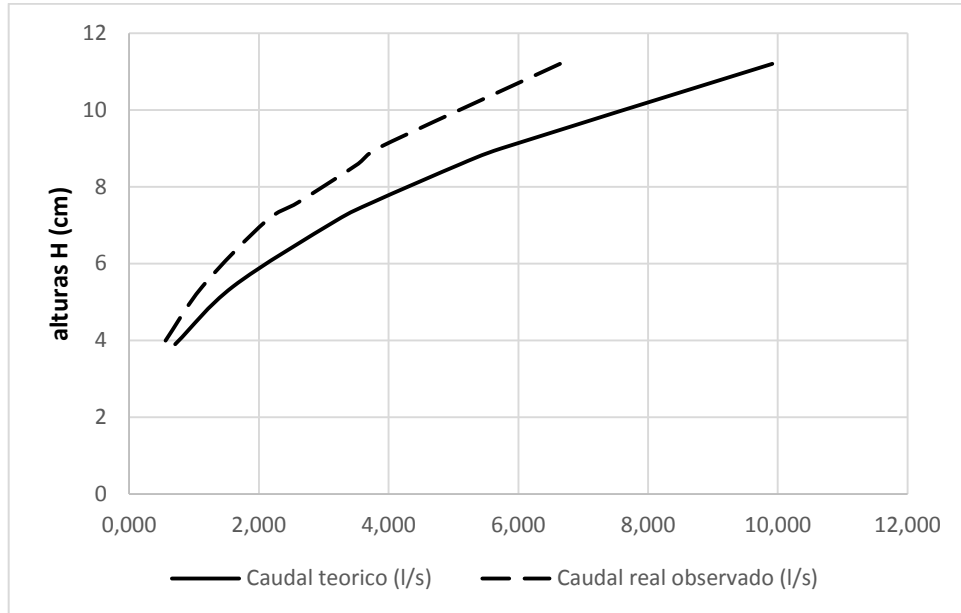
$$Q_{teórico} = 0,02362 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

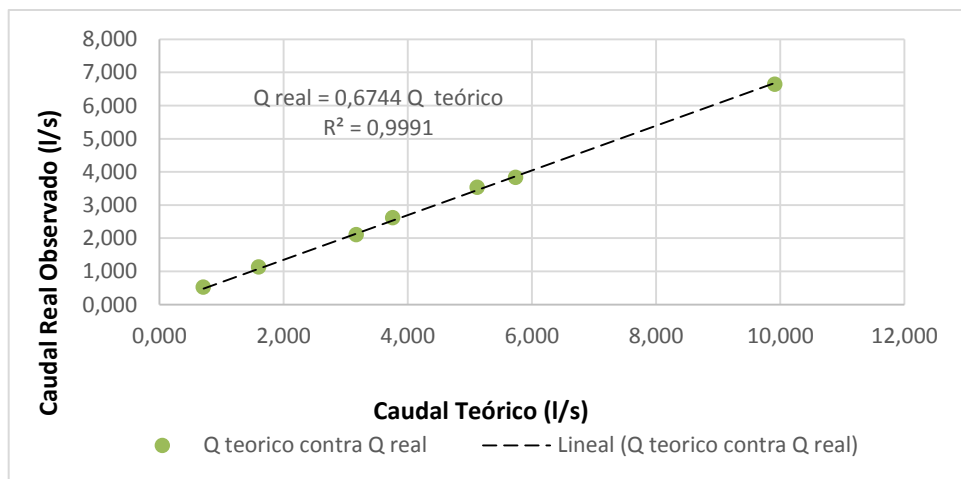
$H = cm$

Figura 63. **Curvas de descarga VT-90°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 64. **Obtención del coeficiente de descarga VT-90°**



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Cd = 0,6744$$

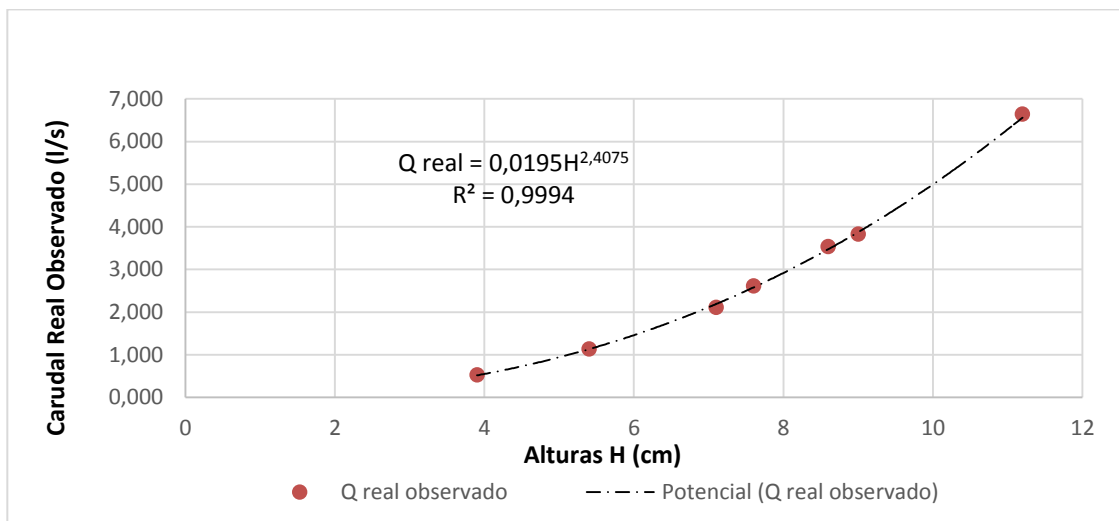
$$Q_{real} = 0,6744(0,02362H^{\frac{5}{2}})$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

Figura 65. Obtención de la ecuación experimental VT-90°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

$$Q_{real} = 0,0195H^{2,4075}$$

Donde:

$Q_{teórico} = l/s$

$H = cm$

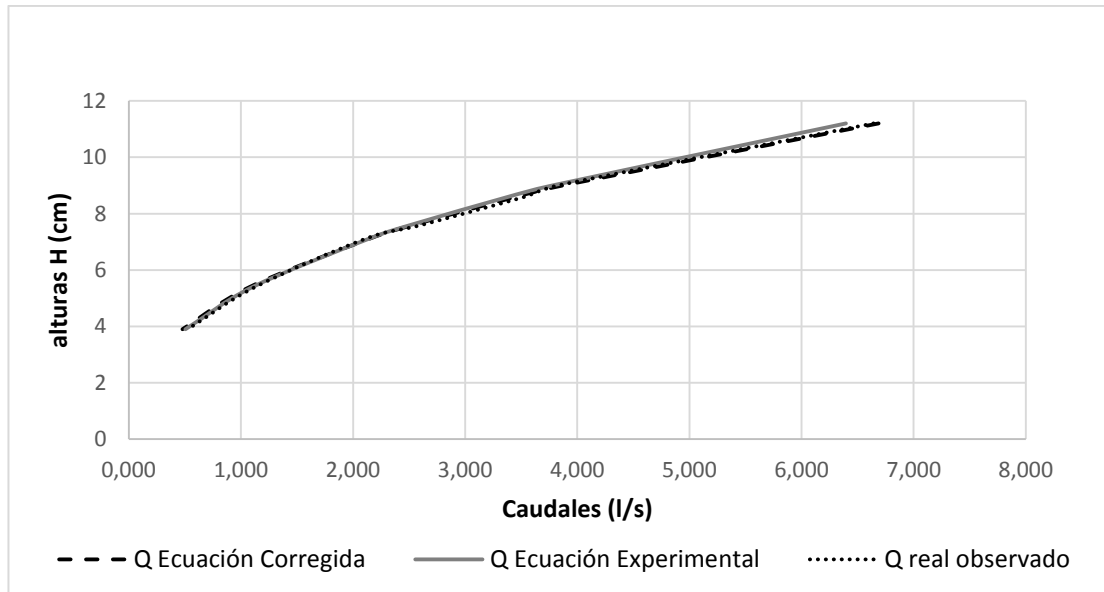


Tabla XXXI. Relación de caudales VT-90°

H (cm)	Q real observado V/t (l/s)	Q ecuación calibrada (l/s)	Error (%)	Q ecuación experimental (l/s)	Error (%)
11,2	6,642	6,687	0,6775	6,396	3,7109
9	3,828	3,871	1,1265	3,778	1,3050
8,6	3,533	3,455	2,2114	3,386	4,1605
7,6	2,613	2,536	2,9114	2,515	3,7523
7,1	2,105	2,140	1,6556	2,135	1,4115
5,4	1,128	1,079	4,3393	1,104	2,1221
3,9	0,524	0,478	8,7611	0,505	3,7936

Fuente: elaboración propia.

Figura 66. Relación de caudales VT-90°



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5. Sistema estadístico informático SPSS

SPSS es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y las empresas de investigación de mercado. 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.

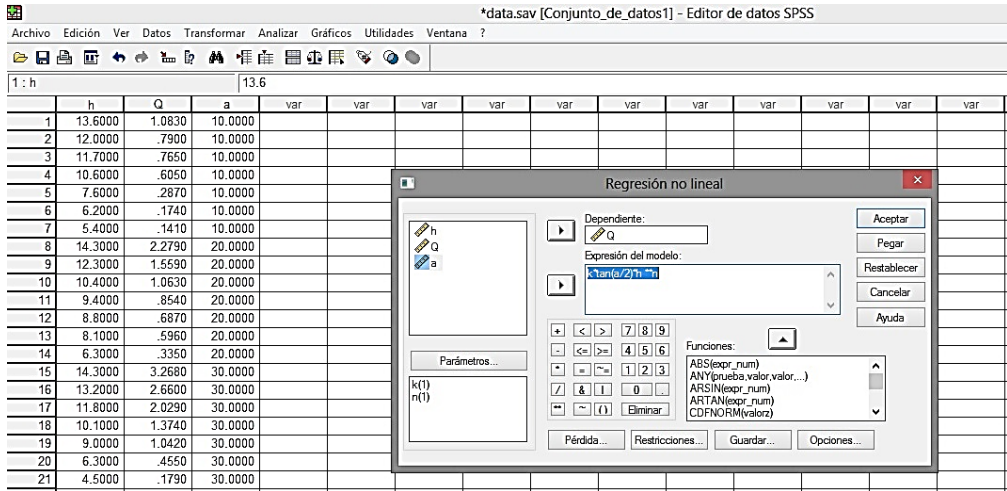
Es uno de los programas estadísticos más conocidos teniendo en cuenta su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y un sencillo interface para la mayoría de los análisis. En la versión 12 de SPSS se podían realizar análisis con 2 millones de registros y 250,000 variables. El programa consiste en un módulo base y módulos anexos que se han ido actualizando constantemente con nuevos procedimientos estadísticos.

Figura 67. Programa estadístico SPSS/Creando parámetros

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación	Medida
1	h	Numérico	8	4	altura de vertedero en cm	Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Escala
2	Q	Numérico	8	4	caudal en l/s	Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Escala
3	a	Numérico	8	4	angulo de apertura en °	Ninguno	Ninguno	8	Derecha	Escala
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Programa estadístico SPSS/definiendo ecuación



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1. Calibración de vertedero VT-10°/SPSS

Según lo observado, en este estudio, se tiene que el coeficiente de descarga Cd no es constante en ningún vertedero, debido a la variación en su ángulo de abertura. Se recurre a SPSS para deducir un modelo matemático que relacione  $\theta$  y H y bajo este concepto se presenta la siguiente ecuación:

$$Q = 0,016 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) H^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

$Q$  = caudal real observado en l/s

$\alpha$  = ángulo de abertura en grados sexagesimales

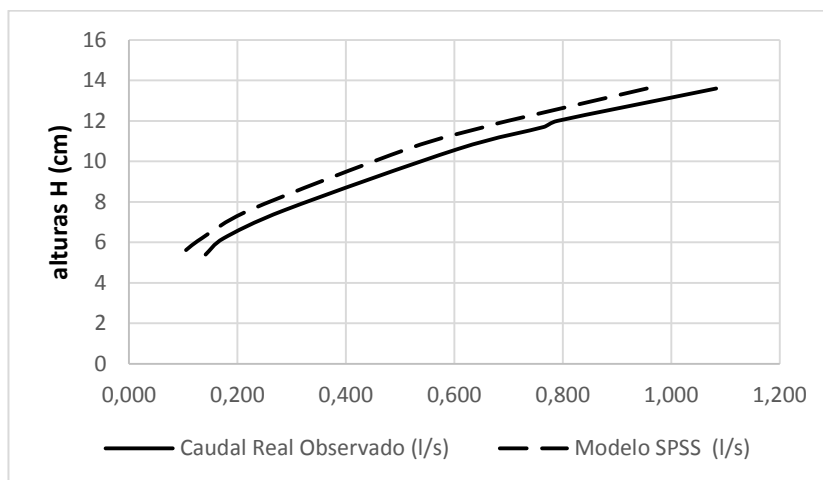
$H$  = altura de la carga de agua en cm

Tabla XXXII. Datos obtenidos para el vertedero VT-10°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
13,6	10,000	1,083	0,9548	11,8215
12	10,000	0790	0,6983	11,5909
11,7	10,000	0765	0,6554	14,2900
10,6	10,000	0,605	0,5121	15,3679
7,6	10,000	0,287	0,2229	22,4450
6,2	10,000	0,174	0,1340	23,1085
5,4	10000	0,141	0,0949	32,8059

Fuente: elaboración propia.

Figura 69. Curvas de descarga VT-10°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.2. Calibración de vertedero VT-20°/SPSS

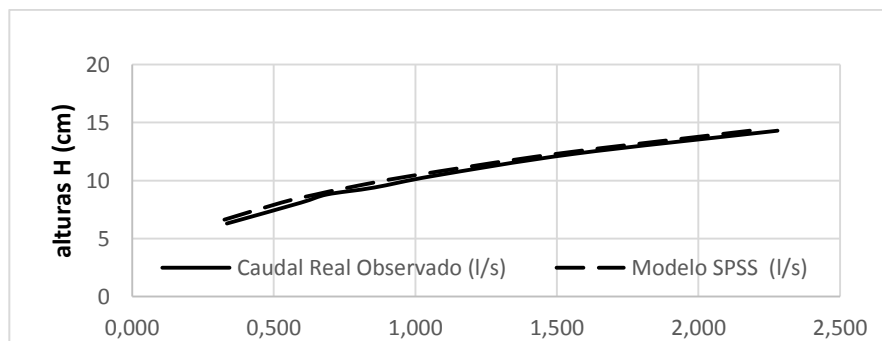
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-20°.

Tabla XXXIII. Datos obtenidos para el vertedero VT-20°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
14,3	20,000	2,279	2,1816	4,2819
12,3	20,000	1,559	1,4969	3,9944
10,4	20,000	1,063	0,9841	7,4555
9,4	20,000	0,854	0,7643	10,5566
8,8	20,000	0,687	0,6481	5,6373
8,1	20,000	0,596	0,5268	11,6596
6,3	20,000	0,335	0,2811	15,9904

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Curvas de descarga VT-20°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.3. Calibración de vertedero VT-30°/SPSS

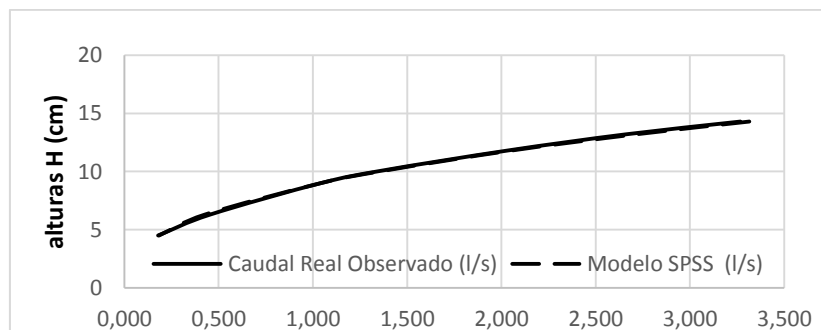
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-30°.

Tabla XXXIV. Datos obtenidos para el vertedero VT-30°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
14,3	30,000	3,268	3,3152	1,4479
13,2	30,000	2,660	2,7140	2,0254
11,8	30,000	2,029	2,0506	1,0397
10,1	30,000	1,374	1,3899	11582
9	30,000	1,042	1,0418	0,0241
6,3	30,000	0,455	0,4271	6,1929
4,5	30,000	0,179	0,1842	2,9124

Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Curvas de descarga VT-30°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.4. Calibración de vertedero VT-40°/SPSS

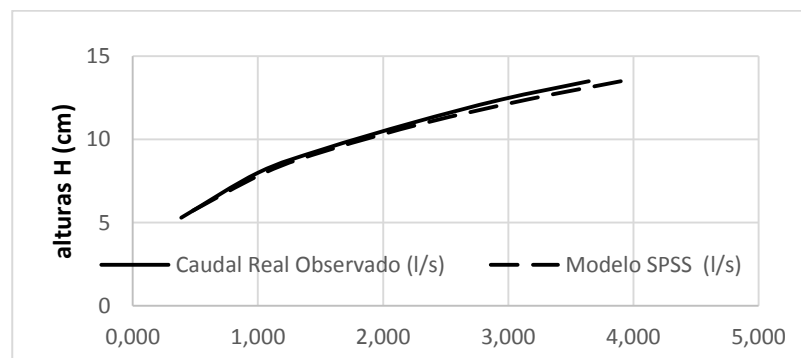
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-40°.

Tabla XXXV. Datos obtenidos para el vertedero VT-40°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
13,5	40,000	3,644	3,8996	7,0154
12,4	40,000	2,946	3,1531	7,0389
11	40,000	2,234	2,3371	4,6205
9,4	40,000	1,516	1,5776	4,0858
8	40,000	1,000	1,0542	5,3742
5,3	40,000	0,387	0,3766	2,7390

Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Curvas de descarga VT-40°/SPSS



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.5. Calibración de vertedero VT-45°/SPSS

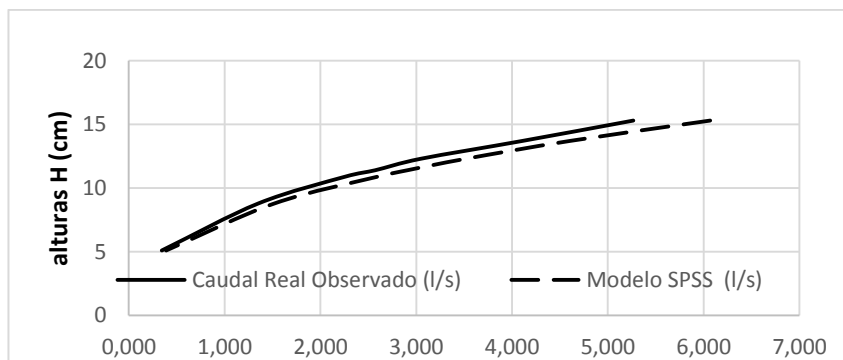
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-45°.

Tabla XXXVI. Datos obtenidos para el vertedero VT-45°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
15,3	45,000	5,266	6,0684	15,2321
13,7	45,000	4,108	4,6041	12,0868
12,3	45,000	3,046	3,5165	15,4316
11,4	45,000	2,572	2,9081	13,0716
10,9	45,000	2,260	2,5996	15,0059
8,8	45,000	1,354	1,5225	1,4228
5,1	45,000	0,344	0,3893	13,1486

Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Curvas de descarga VT-45°/SPSS



Fuente: elaboración propia.



### 3.5.6. Calibración de vertedero VT-50°/SPSS

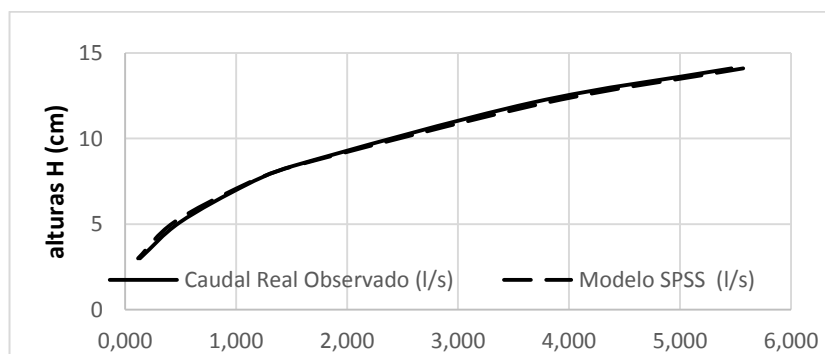
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-50°.

Tabla XXXVII. Datos obtenidos para el vertedero VT-50°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
14,1	50,000	5,464	5,5698	1,9346
12,1	50,000	3,669	3,7998	3,5649
8,4	50,000	1,514	1,5258	0,7512
7,3	50,000	1,093	1,0742	1,7537
5,1	50,000	0,492	0,4382	10,8452
3	50000	0133	0,1163	12,5941

Fuente: elaboración propia.

Figura 74. Curvas de descarga VT-50°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.7. Calibración de vertedero VT-60°/SPSS

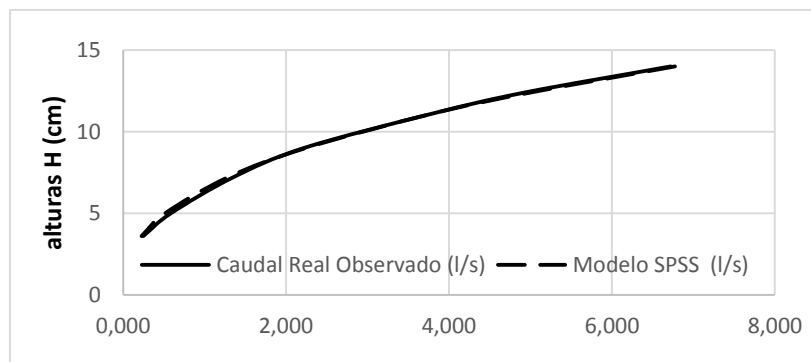
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-60°.

Tabla XXXVIII. Datos obtenidos para el vertedero VT-60°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
14	60,000	6,722	6,7746	0,7786
12,4	60,000	4,930	5,0017	1,4571
11,1	60,000	3,790	3,7920	0,0602
9	60,000	2,221	2,2447	1,0786
7,2	60,000	1,350	1,2850	4,8155
5	60,000	0,587	0,5164	12,0776
3,6	60,000	0,248	0,2272	8,2896

Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Curvas de descarga VT-60°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.8. Calibración de vertedero VT-70°/SPSS

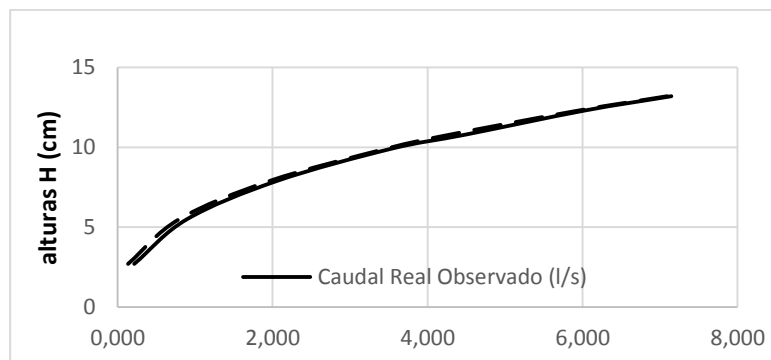
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-70°.

Tabla XXXIX. Datos obtenidos para el vertedero VT-70°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
13,2	70,000	7,147	7,0922	0,7632
12,3	70,000	6,022	5,9444	1,2960
10,8	70,000	4,493	4,2944	4,4287
9,9	70,000	3,522	3,4549	1,9127
7,9	70,000	2,058	1,9652	4,5217
5,5	70,000	0,896	0,7948	11,2546
2,7	70,000	0,215	0,1342	37,4357

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. Curvas de descarga VT-70°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa de Excel.

### 3.5.9. Calibración de vertedero VT-80°/SPSS

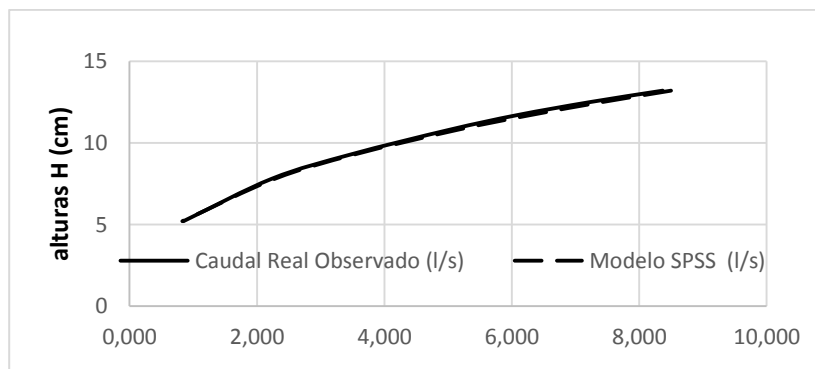
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-80°.

Tabla XL. Datos obtenidos para el vertedero VT-80°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
13,2	80,000	8,369	8,4990	1,5547
12,5	80,000	7,227	7,4167	2,6256
11,7	80,000	6,083	6,2864	3,3408
10,8	80,000	5,018	5,1463	2,5607
9,3	80,000	3,483	3,5411	1,6735
7,8	80,000	2,233	2,2812	2,1770
5,2	80,000	0,846	0,8278	2,1263

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. Curvas de descarga VT-80°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

### 3.5.10. Calibración de vertedero VT-90°/SPSS

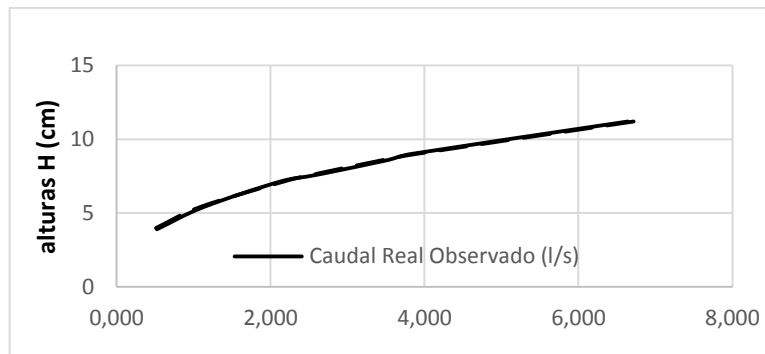
De la ecuación extraída con el programa SPSS se muestran los cálculos y resultados obtenidos con base en los ensayos de observación para el vertedero VT-90°.

Tabla XLI. Datos obtenidos para el vertedero VT-90°/SPSS

H (cm)	Angulo apertura $\theta$	Q real observado	Q generado	Error (%)
11,2	90,000	6,642	6,7169	1,1245
9	90,000	3,828	3,8880	1,5755
8,6	90,000	3,533	3,4703	1,7772
7,6	90,000	2,613	2,5477	2,4803
7,1	90,000	2,105	2,1492	2,1070
5,4	90,000	1,128	1,0842	3,9145
3,9	90,000	0,524	0,4806	8,3560

Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Curvas de descarga VT-90°/SPSS



Fuente: elaboración propia, con programa Excel.



## CONCLUSIONES

1. Se construyeron los vertederos cuidando la precisión del ángulo que forma la escotadura, para que los datos tomados generen resultados confiables así como las dimensiones exactas para ser instalados en el canal hidrodinámico de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Se realizaron los ensayos necesarios para obtener un factor o coeficiente de descarga para cada vertedero, ya que por la variante en el ángulo se manejaron distintos valores de caudales. Estos coeficientes darán mayor precisión a las ecuaciones teóricas propuestas en los textos de hidráulica.
3. El ángulo de abertura en el diseño del vertedero a utilizar dependerá de la magnitud del caudal, considerando también que vertederos con ángulo de abertura pequeños manejarán tirantes altos, influyendo en el diseño o dimensionamiento del tanque o canal donde serán instalados.
4. Con base en este estudio se puede estimar una buena precisión en el caudal que circula sobre un vertedero de tipo triangular simplemente con medir la altura de carga o tirante. Esto será de mucha utilidad en plantas de tratamiento y estaciones de aforo de pequeños ríos.
5. El coeficiente de descarga  $C_d$  no es constante en ningún vertedero debido a la variación en su ángulo de abertura por lo se recurrió al software estadístico SPSS para deducir un modelo matemático que

relacione  $\theta$  y H, generando resultados confiables para vertederos de apertura mayores a  $50^\circ$ .



## RECOMENDACIONES

1. Al realizar ensayos o mediciones de caudal con vertederos de pared delgada. Es importante que el flujo sobre la cresta sea libre y no presente escurrimientos en sus paredes, ya que esto afectará la precisión de las fórmulas.
2. Al proceder a tomar lecturas de carga  $H$  es necesario que el flujo en el canal se estabilice, se aconseja tomar datos del tirante mayor al menor, cuidando en esta última parte que el flujo al final del canal presente una salida con forma de tiro parabólico, sin presentar escurrimientos. Para cada toma se debe esperar el tiempo necesario para que el nivel del flujo se estabilice después de regular la válvula, el cual depende del ángulo de abertura en cada vertedero.
3. Al hacer uso del sistema de bombeo que suministra agua al canal se deben revisar los niveles del tanque cisterna para que la bomba no presente cavitación y prolongue el proceso de estabilización del caudal e incluso pueda apagarse, provocando el tener que repetir todo el proceso de aforo.
4. Las lecturas para los tirantes se deben realizar a una distancia de 4 veces el tirante mayor, distancia medida a partir del vertedero



## BIBLIOGRAFÍA

1. CADAVID, Juan H. *Hidráulica de canales*. Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2002. 273 p.
2. Decenio Internacional para la Acción. *El agua fuente de vida 2005-2015*. ONU-DAES. 2010. 25 p.
3. MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Fundamentos para la práctica de laboratorio de hidráulica*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional, 1997. 340 p.
4. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Colombia: Editorial Alfaomega Grupo Editos S. A., 1995. 487 p.
5. MERRIT, Frederick S. *Manual del Ingeniero Civil*. México: E MC Graw Hill, 1998. 675 p.
6. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica General*. México: Limusa, 1998. 561 p.
7. STREETER, Víctor L; WYLE, E. Benjamin. *Mecánica de los fluidos*. Santafé de Bogotá, Colombia: MCGraw-Hill, 1996. 475 p.
8. TE CHOW, Ven. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill, 2006. 740 p.



## ANEXOS

### Anexo 1. VolUmen del tanque en función de altura

Tabla 1. **Volumen del tanque en función de altura**

h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)
0	54.62	3.9	81.38	7.8	108.20	11.7	135.10
0.1	55.31	4	82.06	7.9	108.89	11.8	135.79
0.2	55.99	4.1	82.75	8	109.58	11.9	136.48
0.3	56.68	4.2	83.44	8.1	110.27	12	137.17
0.4	57.36	4.3	84.12	8.2	110.96	12.1	137.86
0.5	58.05	4.4	84.81	8.3	111.65	12.2	138.56
0.6	58.73	4.5	85.50	8.4	112.34	12.3	139.25
0.7	59.42	4.6	86.19	8.5	113.02	12.4	139.94
0.8	60.10	4.7	86.87	8.6	113.71	12.5	140.63
0.9	60.79	4.8	87.56	8.7	114.40	12.6	141.32
1	61.48	4.9	88.25	8.8	115.09	12.7	142.01
1.1	62.16	5	88.94	8.9	115.78	12.8	142.70
1.2	62.85	5.1	89.62	9	116.47	12.9	143.39
1.3	63.53	5.2	90.31	9.1	117.16	13	144.08
1.4	64.22	5.3	91.00	9.2	117.85	13.1	144.78
1.5	64.90	5.4	91.69	9.3	118.54	13.2	145.47
1.6	65.59	5.5	92.37	9.4	119.23	13.3	146.16
1.7	66.28	5.6	93.06	9.5	119.92	13.4	146.85
1.8	66.96	5.7	93.75	9.6	120.61	13.5	147.54
1.9	67.65	5.8	94.44	9.7	121.30	13.6	148.23
2	68.33	5.9	95.12	9.8	121.99	13.7	148.92
2.1	69.02	6	95.81	9.9	122.68	13.8	149.62
2.2	69.71	6.1	96.50	10	123.37	13.9	150.31
2.3	70.39	6.2	97.19	10.1	124.06	14	151.00
2.4	71.08	6.3	97.88	10.2	124.75	14.1	151.69
2.5	71.76	6.4	98.56	10.3	125.44	14.2	152.38
2.6	72.45	6.5	99.25	10.4	126.13	14.3	153.07
2.7	73.14	6.6	99.94	10.5	126.82	14.4	153.77
2.8	73.82	6.7	100.63	10.6	127.51	14.5	154.46
2.9	74.51	6.8	101.32	10.7	128.20	14.6	155.15
3	75.20	6.9	102.01	10.8	128.89	14.7	155.84
3.1	75.88	7	102.69	10.9	129.58	14.8	156.53
3.2	76.57	7.1	103.38	11	130.27	14.9	157.23
3.3	77.26	7.2	104.07	11.1	130.96	15	157.92
3.4	77.94	7.3	104.76	11.2	131.65	15.1	158.61
3.5	78.63	7.4	105.45	11.3	132.34	15.2	159.30
3.6	79.32	7.5	106.14	11.4	133.03	15.3	160.00
3.7	80.00	7.6	106.82	11.5	133.72	15.4	160.69
3.8	80.69	7.7	107.51	11.6	134.41	15.5	161.38
h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)
15.6	162.07	19.6	189.81	23.6	217.63	27.6	245.52
15.7	162.77	19.7	190.51	23.7	218.33	27.7	246.22
15.8	163.46	19.8	191.20	23.8	219.02	27.8	246.92

Continuación de la tabla 1.

15.9	164.15	19.9	191.90	23.9	219.72	27.9	247.62
16	164.84	20	192.59	24	220.42	28	248.32
16.1	165.54	20.1	193.29	24.1	221.11	28.1	249.01
16.2	166.23	20.2	193.98	24.2	221.81	28.2	249.71
16.3	166.92	20.3	194.68	24.3	222.50	28.3	250.41
16.4	167.62	20.4	195.37	24.4	223.20	28.4	251.11
16.5	168.31	20.5	196.06	24.5	223.90	28.5	251.81
16.6	169.00	20.6	196.76	24.6	224.60	28.6	252.51
16.7	169.69	20.7	197.45	24.7	225.29	28.7	253.21
16.8	170.39	20.8	198.15	24.8	225.99	28.8	253.91
16.9	171.08	20.9	198.84	24.9	226.69	28.9	254.60
17	171.77	21	199.54	25	227.38	29	255.30
17.1	172.47	21.1	200.23	25.1	228.08	29.1	256.00
17.2	173.16	21.2	200.93	25.2	228.78	29.2	256.70
17.3	173.85	21.3	201.63	25.3	229.47	29.3	257.40
17.4	174.55	21.4	202.32	25.4	230.17	29.4	258.10
17.5	175.24	21.5	203.02	25.5	230.87	29.5	258.80
17.6	175.93	21.6	203.71	25.6	231.57	29.6	259.50
17.7	176.63	21.7	204.41	25.7	232.26	29.7	260.20
17.8	177.32	21.8	205.10	25.8	232.96	29.8	260.90
17.9	178.01	21.9	205.80	25.9	233.66	29.9	261.60
18	178.71	22	206.49	26	234.36	30	262.30
18.1	179.40	22.1	207.19	26.1	235.05	30.1	262.99
18.2	180.10	22.2	207.88	26.2	235.75	30.2	263.69
18.3	180.79	22.3	208.58	26.3	236.45	30.3	264.39
18.4	181.48	22.4	209.28	26.4	237.15	30.4	265.09
18.5	182.18	22.5	209.97	26.5	237.84	30.5	265.79
18.6	182.87	22.6	210.67	26.6	238.54	30.6	266.49
18.7	183.56	22.7	211.36	26.7	239.24	30.7	267.19
18.8	184.26	22.8	212.06	26.8	239.94	30.8	267.89
18.9	184.95	22.9	212.76	26.9	240.64	30.9	268.59
19	185.65	23	213.45	27	241.33	31	269.29
19.1	186.34	23.1	214.15	27.1	242.03	31.1	269.99
19.2	187.04	23.2	214.84	27.2	242.73	31.2	270.69
19.3	187.73	23.3	215.54	27.3	243.43	31.3	271.39
19.4	188.42	23.4	216.24	27.4	244.13	31.4	272.09
19.5	189.12	23.5	216.93	27.5	244.82	31.5	272.79
h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)
31.6	273.49	35.6	301.54	40.5	336.00	44.5	364.22
31.7	274.19	35.7	302.24	40.6	336.71	44.6	364.92
31.8	274.89	35.8	302.94	40.7	337.41	44.7	365.63
31.9	275.59	35.9	303.65	40.8	338.11	44.8	366.34
32	276.29	36	304.35	40.9	338.82	44.9	367.04
32.1	276.99	36.1	305.05	41	339.52	45	367.75
32.2	277.69	36.2	305.75	41.1	340.23	45.1	368.46
32.3	278.39	36.3	306.45	41.2	340.93	45.2	369.16
32.4	279.10	36.4	307.16	41.3	341.64	45.3	369.87
32.5	279.80	36.5	307.86	41.4	342.34	45.4	370.58
32.6	280.50	36.6	308.56	41.5	343.05	45.5	371.28
32.7	281.20	36.7	309.27	41.6	343.75	45.6	371.99
32.8	281.90	36.8	309.97	41.7	344.46	45.7	372.70
32.9	282.60	36.9	310.67	41.8	345.16	45.8	373.41
33	283.30	37	311.37	41.9	345.87	45.9	374.11

Continuación de la tabla 1.

33.1	284.00	37.1	312.08	42	346.57	46	374.82
33.2	284.70	37.2	312.78	42.1	347.28	46.1	375.53
33.3	285.40	37.3	313.48	42.2	347.98	46.2	376.23
33.4	286.10	37.4	314.18	42.3	348.69	46.3	376.94
33.5	286.80	37.5	314.89	42.4	349.39	46.4	377.65
33.6	287.51	37.6	315.59	42.5	350.10	46.5	378.36
33.7	288.21	37.7	316.29	42.6	350.81	46.6	379.06
33.8	288.91	37.8	317.00	42.7	351.51	46.7	379.77
33.9	289.61	37.9	317.70	42.8	352.22	46.8	380.48
34	290.31	38	318.40	42.9	352.92	46.9	381.19
34.1	291.01	38.1	319.11	43	353.63	47	381.89
34.2	291.71	38.2	319.81	43.1	354.33	47.1	382.60
34.3	292.42	38.3	320.51	43.2	355.04	47.2	383.31
34.4	293.12	38.4	321.22	43.3	355.75	47.3	384.02
34.5	293.82	38.5	321.92	43.4	356.45	47.4	384.72
34.6	294.52	38.6	322.62	43.5	357.16	47.5	385.43
34.7	295.22	38.7	323.33	43.6	357.86	47.6	386.14
34.8	295.92	38.8	324.03	43.7	358.57	47.7	386.85
34.9	296.63	38.9	324.74	43.8	359.27	47.8	387.56
35	297.33	39	325.44	43.9	359.98	47.9	388.26
35.1	298.03	40	332.48	44	360.69	48	388.97
35.2	298.73	40.1	333.18	44.1	361.39	48.1	389.68
35.3	299.43	40.2	333.89	44.2	362.10	48.2	390.39
35.4	300.13	40.3	334.59	44.3	362.81	48.3	391.10
35.5	300.84	40.4	335.30	44.4	363.51	48.4	391.80
h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)	h(mm)	Vol(lt)
48.5	392.51	51.4	413.07	54.3	433.68	57.2	454.32
48.6	393.22	51.5	413.78	54.4	434.39	57.3	455.03
48.7	393.93	51.6	414.49	54.5	435.10	57.4	455.74
48.8	394.64	51.7	415.20	54.6	435.81	57.5	456.46
48.9	395.35	51.8	415.91	54.7	436.52	57.6	457.17
49	396.06	51.9	416.62	54.8	437.23	57.7	457.88
49.1	396.76	52	417.33	54.9	437.94	57.8	458.59
49.2	397.47	52.1	418.04	55	438.66	57.9	459.31
49.3	398.18	52.2	418.75	55.1	439.37	58	460.02
49.4	398.89	52.3	419.46	55.2	440.08	58.1	460.73
49.5	399.60	52.4	420.17	55.3	440.79	58.2	461.45
49.6	400.31	52.5	420.88	55.4	441.50	58.3	462.16
49.7	401.02	52.6	421.59	55.5	442.21	58.4	462.87
49.8	401.73	52.7	422.30	55.6	442.92	58.5	463.58
49.9	402.43	52.8	423.01	55.7	443.64	58.6	464.30
50	403.14	52.9	423.73	55.8	444.35	58.7	465.01
50.1	403.85	53	424.44	55.9	445.06	58.8	465.72
50.2	404.56	53.1	425.15	56	445.77	58.9	466.44
50.3	405.27	53.2	425.86	56.1	446.48	59	467.15
50.4	405.98	53.3	426.57	56.2	447.20	59.1	467.86
50.5	406.69	53.4	427.28	56.3	447.91	59.2	468.58
50.6	407.40	53.5	427.99	56.4	448.62	59.3	469.29
50.7	408.11	53.6	428.70	56.5	449.33	59.4	470.00
50.8	408.82	53.7	429.41	56.6	450.04	59.5	470.72
50.9	409.53	53.8	430.12	56.7	450.76	59.6	471.43
51	410.24	53.9	430.83	56.8	451.47	59.7	472.15
51.1	410.95	54	431.54	56.9	452.18	59.8	472.86

Continuación de la tabla 1.

51.2	411.65	54.1	432.25	57	452.89	59.9	473.57
51.3	412.36	54.2	432.97	57.1	453.61	60	474.29