



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

**COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA
DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD
DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE
LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTÍN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO**

Javier Enrique Godoy López

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA
DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD
DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE
LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTÍN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAVIER ENRIQUE GODOY LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTÍN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 9 de mayo de 2016.


Javier Enrique Godoy López

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 14 de Mayo de 2019

Doctor en Ciencias
Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Javier Enrique Godoy López, quien se identifica con Registro Académico 2007-14688 CUI No. 2446 30623 0101, titulado **COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTIN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO**, 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"

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 6496

Dr C Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

Docente Departamento de Hidráulica



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 14 de mayo de 2019
 Ref. IC.026.19

Señor
 Javier Enrique Godoy López
 Facultad de Ingeniería
 USAC

Señor Godoy López:

Por medio de la presente notifico a usted que se autoriza revalidación y se concede prórroga de seis meses a partir de la fecha, para realizar su trabajo de graduación aprobado con título **COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUÍDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTIN ACASAGUASTLAN, EL PROGRESO** recordándole que dicho trabajo deberá ser elaborado bajo el reglamento de Trabajo de Graduación vigente.

Sin otro particular me suscribo de ustedes, atentamente

ID Y ENSEÑAD A TODOS

[Handwritten Signature]
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director Escuela Ingeniería Civil



/mrrm.





Guatemala, 17 de Mayo de 2019

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

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTIN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Javier Enrique Godoy López, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza.

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

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Dr C. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica

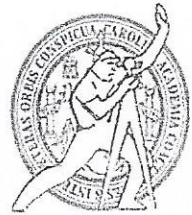




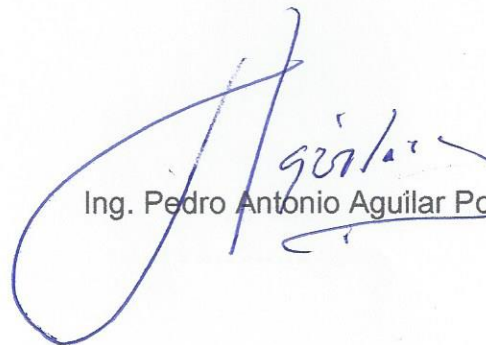
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Javier Enrique Godoy López **COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA VERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTÍN ACASAGUASTLAN, EL PROGRESO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, septiembre 2019

/mrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

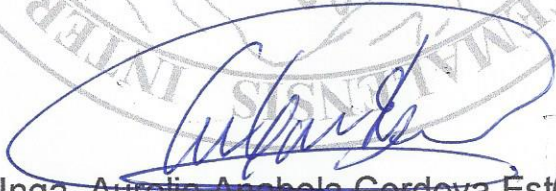


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.348.2019

La Decana 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: **COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA INVERTEDEROS DE PARED DELGADA DESARROLLADAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, EN EL CANAL DE RIEGO DE LA ALDEA EL RANCHO, SAN AGUSTÍN ACASAGUASTLÁN, EL PROGRESO,** presentado por el estudiante universitario: **Javier Enrique Godoy López,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, Septiembre de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía en los momentos más importantes de mi vida y por permitirme cumplir esta meta.
- Mis padres** Por su paciencia y amor incondicional, por apoyarme en cada momento de mi vida, porque sin ellos no hubiera podido lograr este triunfo.
- Mis hermanos** Por estar siempre pendientes de mí, por su apoyo, por su cariño, sus regaños y por darme siempre un ejemplo a seguir.
- Mi novia** Por todo su amor, por ser alguien muy especial en mi vida y por impulsarme todos los días a terminar mi carrera y seguir adelante.
- Mi familia** Tíos, primos y sobrinos por compartir este triunfo conmigo.
- Mis amigos** Por compartir este momento conmigo.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi alma mater

La tres veces centenaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente a la Facultad de Ingeniería, por brindarme los conocimientos necesarios para desempeñarme como ingeniero civil.

Mi asesor

El Dr. C. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, por darme la oportunidad de realizar esta investigación con él, y por transmitirme todos sus conocimientos en la elaboración de este trabajo de graduación.

COCODE de la aldea El Rancho

Por permitirme realizar el trabajo de campo de la investigación en el canal de riego.

Mis catedráticos

Por transmitirme sus conocimientos en cada curso.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. MEDICIÓN DE CAUDALES	1
1.1. Hidrometría.....	1
1.1.1. Medición del agua.....	1
1.2. Métodos de medición de flujo en canales abiertos	2
1.2.1. Método volumétrico	2
1.2.2. Método químico	3
1.2.3. Método velocidad-superficie	5
1.2.3.1. Aforos con molinete	6
1.2.3.2. Aforos con flotadores.....	8
1.2.4. Vertederos	9
2. VERTEDEROS.....	11
2.1. Definición de vertederos	11
2.2. Clasificación de vertederos.....	11
2.2.1. Vertederos de pared delgada	12
2.2.1.1. Secciones típicas.....	12
2.2.1.2. Vertederos de sección rectangular	12
2.2.1.3. Vertederos de sección triangular	13

	2.2.1.4.	Vertederos de sección trapezoidal	14
	2.2.2.	Cuidado y mantenimiento de los vertederos	15
	2.2.3.	Ventajas y desventajas de los vertederos	16
	2.2.4.	Ecuaciones para el cálculo de vertederos de pared delgada determinadas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala	17
3.		REALIZACIÓN DE LOS AFOROS	21
	3.1.	Selección de la obra para la instalación de las secciones de aforo	21
	3.2.	Construcción y colocación de los vertederos	22
	3.3.	Aforos con vertederos.	23
	3.4.	Aforos con molinete.....	25
	3.5.	Aforo con flotadores	27
4.		ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
	4.1.	Comparación de los caudales por el método de molinete.....	31
		4.1.1. Vertedero triangular.....	31
		4.1.2. Vertedero rectangular.....	33
		4.1.3. Vertedero trapezoidal	34
	4.2.	Comparación de los caudales por el método de flotadores.....	36
		4.2.1. Vertedero triangular.....	36
		4.2.2. Vertedero rectangular.....	38
		4.2.3. Vertedero trapezoidal	39

CONCLUSIONES..... 43
RECOMENDACIONES..... 45
BIBLIOGRAFÍA..... 47

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Aforo volumétrico	3
2.	Aforo método químico	5
3.	Molinete de copas	6
4.	Aforo con molinete	7
5.	Método de aforo con flotadores.....	8
6.	Aforo con flotadores	9
7.	Vertederos.....	10
8.	Vertedero de sección rectangular	13
9.	Vertedero de sección triangular	14
10.	Vertedero de sección trapezoidal.....	15
11.	Canal de riego.....	21
12.	Diseño de vertedero rectangular	22
13.	Diseño de vertedero trapezoidal y vertedero triangular.....	23
14.	Esquema de aforo con vertederos	25
15.	Esquema de aforo con molinete.....	27
16.	Esquema de aforo con flotadores	29
17.	Comparación de caudales para vertedero triangular y molinete	32
18.	Comparación de caudales para vertedero rectangular y molinete	34
19.	Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y molinete.....	35
20.	Comparación de caudales para vertedero triangular y flotadores	37
21.	Comparación de caudales para vertedero rectangular y flotadores	39
22.	Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y flotadores	41

TABLAS

I.	Cambio de altura y velocidades para vertedero triangular	31
II.	Comparación de caudales para vertedero triangular y molinete	32
III.	Cambio de altura y velocidades para vertedero rectangular	33
IV.	Comparación de caudales para vertedero rectangular y molinete	33
V.	Cambio de altura y velocidades para vertedero trapezoidal	34
VI.	Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y molinete	35
VII.	Cambio de altura y tiempos para vertedero triangular	36
VIII.	Comparación de caudales para vertedero triangular y flotadores.....	37
IX.	Cambio de altura y tiempos para vertedero rectangular	38
X.	Comparación de caudales para vertedero rectangular y flotadores.....	38
XI.	Cambio de altura y tiempos para vertedero trapezoidal.....	40
XII.	Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y flotadores	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura de carga sobre el vertedero
h_t	Altura del espejo de agua
A	Área
b	Base del vertedero rectangular
Q	Caudal
cm	Centímetros
Δh	Diferencia de alturas
d	Distancia
θ	Gradiente de inclinación
l	Litros
m	Metros
mm	Milímetros
h_o	Nivel inicial
s	Segundo
t₁	Tiempo 1
t₂	Tiempo 2
V_p	Velocidad promedio
V₁	Velocidad 1
V₂	Velocidad 2

GLOSARIO

Aforo	Conjunto de operaciones para determinar el caudal en un curso de agua para un nivel observado.
Canal	Es un conducto en el cual el líquido fluye con una superficie libre.
Carga	Es una elevación de la superficie del fluido, expresada en unidades de altura.
Caudal	Volumen de agua que pasa por la sección transversal del cauce por unidad de tiempo, y se expresa en m ³ /s o l/s.
Fluido	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzos de corte.
Flujo	Movimiento de un fluido que atraviesa una sección transversal.
Limnómetro	Instrumento que mide las variaciones del nivel de la superficie del agua.
Sedimentos	Material sólido que es transportado por una corriente de agua y se posa en el fondo de los ríos o canales.

Vertedero

Estructura hidráulica destinada a permitir el paso, libre o controlado, de un fluido.

RESUMEN

El objetivo de este informe final de graduación fue la validación de las ecuaciones para la descarga en vertederos de pared delgada, desarrolladas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, al instalar una estación de aforo en el canal de riego de la aldea El Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso.

Se realizó una visita de campo para observar el canal de riego y determinar la ubicación óptima para la instalación del vertedero, se realizaron las medidas del canal para la fabricación de la base y las diferentes formas geométricas de los vertederos que se utilizaron para medir el caudal. Con el marco instalado se realizaron pruebas para verificar que no existieran fugas y resistiera la presión del agua.

Se realizaron las mediciones de caudal por los métodos de vertedero, molinete y flotador, tomando medidas diferentes para cada método con sus respectivas repeticiones. Por medio de la tabulación de datos se calcularon los diferentes caudales y se compararon con los caudales generados con las ecuaciones de los vertederos desarrolladas en el laboratorio.

Las mediciones se realizaron bajo condiciones controladas en el canal de riego de la aldea El Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso. Los valores encontrados con las formas de los tres vertederos son similares con los caudales encontrados con el método de molinete pero difieren con el método de flotadores.

OBJETIVOS

General

Validar las ecuaciones para la descarga en vertederos de pared delgada, que se han desarrollado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el canal de riego de la Aldea del Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso.

Específicos

1. Realizar la comparación de las ecuaciones de los vertederos de pared delgada con el método de aforo con molinete.
2. Realizar la comparación de las ecuaciones de los vertederos de pared delgada con el método de aforo con flotadores.
3. Comparar los porcentajes de error de la medición del caudal con vertederos de pared delgada con el método de aforo con molinete y aforo por flotadores.
4. Aplicar las investigaciones realizadas en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería para el beneficio de un sector de la sociedad.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería hidráulica se cuenta con diferentes dispositivos para medir caudales en cauces naturales y artificiales, dentro de estos dispositivos se encuentran los vertederos, los cuales pueden tener diferentes secciones y áreas dependiendo del uso o la función que deben cumplir.

Los vertederos son diques o paredes que se oponen al flujo y que poseen una escotadura con una forma geométrica regular por la cual pasa el flujo. En general hay dos tipos de vertederos, los de pared delgada y gruesa. Los vertederos de pared delgada se usan básicamente para determinar el caudal en cualquier momento en una corriente pequeña. Los vertederos de pared gruesa se usan principalmente para control de excedencias, y su evacuación puede ser libre o controlada. Los vertederos que ahora interesan son los de pared delgada y dentro de estos los más utilizados son el vertedero rectangular, el triangular y Cipolletti.

Los vertederos se utilizan como instrumentos de medición de caudales más simples y confiables para medir el flujo del agua en un canal, si se dispone de suficiente caída y la cantidad de agua a medir no es muy grande.

En el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se han ensayado vertederos con el fin de corroborar las ecuaciones que relacionan el caudal que circula con la carga y la geometría del mismo, dado que la deducción teórica de las ecuaciones no contempla aspectos como las pérdidas de carga, las contracciones, etc., por lo que las fórmulas deducidas siempre deben ser

afectadas por factores de corrección que tomen en cuenta los aspectos anteriores, y se han determinado coeficientes de descarga para las ecuaciones teóricas que generan resultados muy confiables.

1. MEDICIÓN DE CAUDALES

1.1. Hidrometría

La hidrometría es una de las partes más importantes de la hidráulica, porque se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua, ya sean estos los que corren en un riachuelo o en un río, los que pasan por una tubería, los que se producen en un pozo, los que llegan o salen de una planta de tratamiento, los que se consumen en una ciudad, industria o residencia, etc., en un tiempo dado.

La función principal de la hidrometría es proveer de datos oportunos y veraces, que una vez procesados proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y evaluación del manejo del agua.

1.1.1. Medición del agua

La medición del gasto es de gran utilidad en la toma de decisiones en la administración de los recursos hidráulicos, en la elaboración de programas de riego y diversas actividades relacionadas con el manejo del agua, por ejemplo:

- Control de la calidad de agua de riego entregada a cada usuario en el área de riego.
- Registro del volumen de agua potable consumido por residencias en las ciudades.

- Detección de problemas en el funcionamiento de una bomba o en la operación de un sistema de riego.
- Determinación de las pérdidas de agua, por conducción en las redes de distribución y evaluación de la factibilidad del revestimiento en acequias y canales de tierra.
- Calibración de estructuras de aforo y determinación de los coeficientes empíricos para su ecuación de descarga.

1.2. Métodos de medición de flujo en canales abiertos

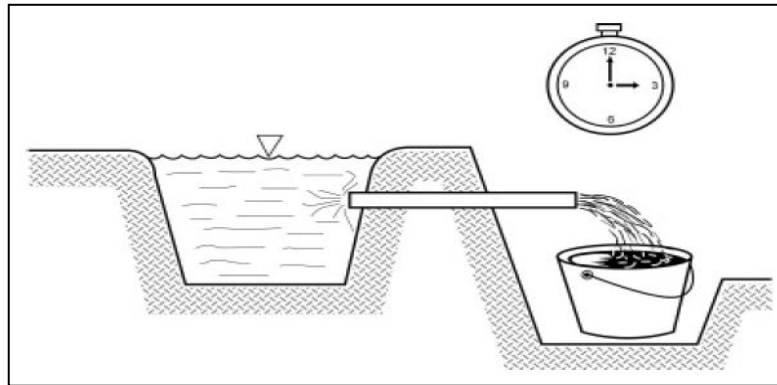
Existen varios métodos de aforo en canales abiertos, dentro de los cuales se encuentran:

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

1.2.1. Método volumétrico

Este método se puede aplicar en la medición de pequeños caudales y se realiza midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, donde se colecta la descarga, el caudal se obtiene dividiendo el volumen del recipiente, con el tiempo de llenado:

Figura 1. **Aforo volumétrico**



Fuente: LUX, Manuel. *Medidores de flujo en canales abiertos*. P. 3.

1.2.2. **Método químico**

Este método se realiza introduciendo en proporción conocida una sustancia química en el agua de la corriente y determinando la cantidad de dicha sustancia que contiene esta, en una sección situada suficientemente lejos aguas abajo, para asegurar su mezcla perfecta con el agua. La sal común es la sustancia empleada comúnmente. Por conveniencia se disuelve la sal en agua antes de introducirla en la corriente, el procedimiento a seguir para aforar por este método es el siguiente:

- Tomar una muestra de agua de la corriente a aforar, y mediante análisis de laboratorio determinar la concentración (c_2) de la sustancia química que se utilizará para el aforo.
- Preparar una solución de concentración (c_1) conocida.
- En un punto turbulento del río, inyectar el caudal (q) de la solución.

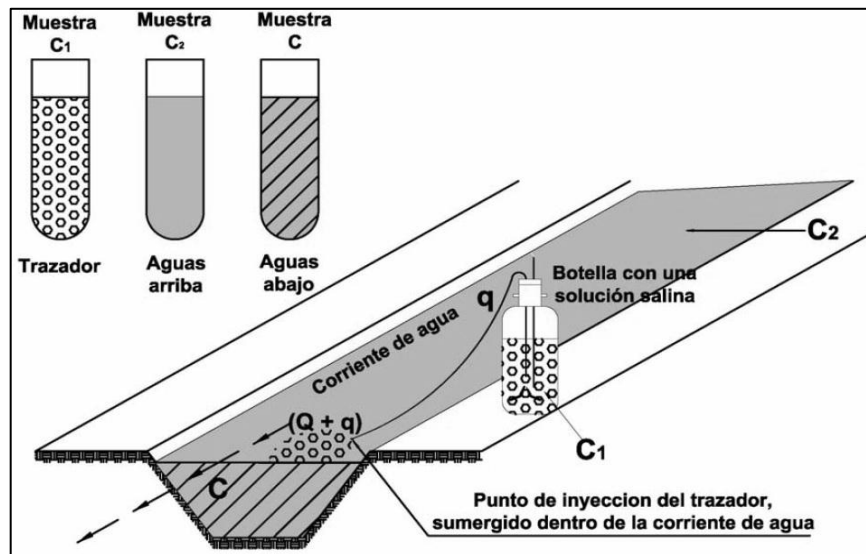
- Aguas abajo del punto de inyección, después que se haya producido una buena mezcla, tomar una muestra de agua y mediante análisis de laboratorio determinar la concentración de (c) resultante, el caudal se obtiene de la siguiente manera:

$$Q = \frac{q(C - C_1)}{C_2 - C}$$

Donde:

- Q = caudal de la corriente aforada en l/s o en m³/s.
- q = caudal del trazador o de la solución salina aplicada, en l/s o en m³/s.
- C₁ = concentración del trazador o de la sustancia química en la solución.
- C₂ = concentración del trazador o de la sustancia química antes de la aplicación.
- C = concentración del trazador o de la sustancia química después de la aplicación.

Figura 2. Aforo método químico



Fuente: *Cueva del ingeniero*. www.cuevadelcivil.blogspot.com. Consulta: 25 de mayo de 2019.

1.2.3. Método velocidad-superficie

En corrientes grandes, las estructuras de medición resultan costosas. Estas se reemplazan con procedimientos en que la sección irregular del río se subdivide en subsecciones para determinar la velocidad media del flujo de cada una y mediante la ecuación de continuidad se determina el caudal de cada subsección. El caudal total (Q) se determina mediante la sumatoria del caudal de todas las subsecciones.

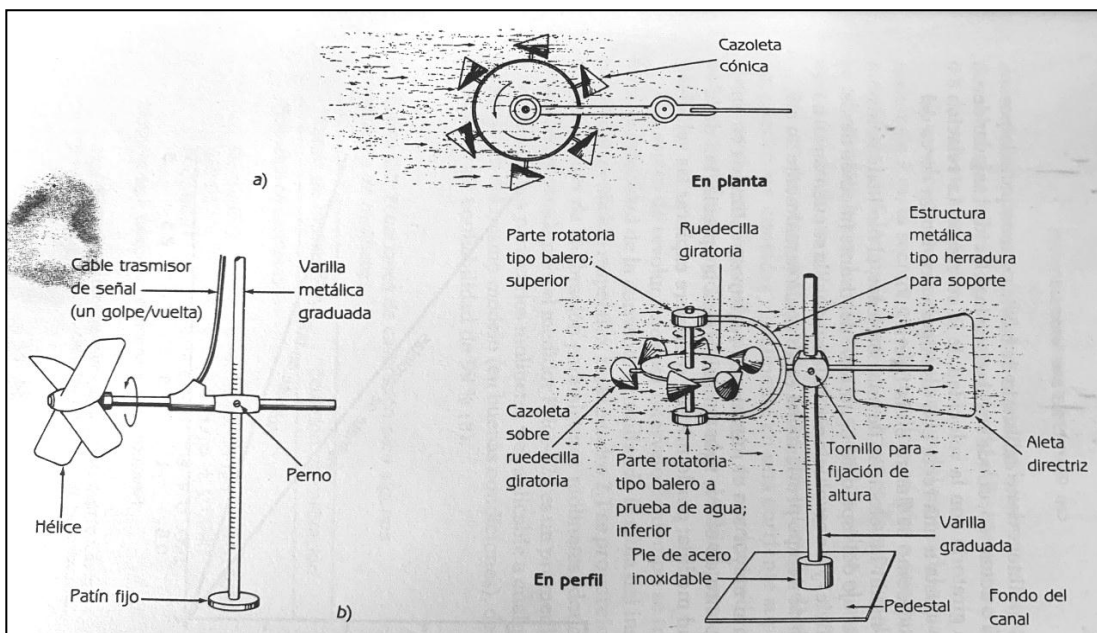
La velocidad media (v) de cada subsección resulta de la medida puntual de la velocidad en puntos convenientes, el área (A) es una medida que se conoce al dividir cada sección, el caudal (Q) se obtiene de la multiplicación de la velocidad media por el área. Los métodos más conocidos para el cálculo de la velocidad media son:

- Molinete
- Flotadores

1.2.3.1. Aforo con molinete

El molinete es un instrumento de medición, constituido por una redcilla con aspas, la cual al ser sumergida en una corriente gira proporcionalmente a la velocidad de la misma. El molinete es montado sobre una varilla para el aforo de corrientes superficiales, también pueden ser suspendidos desde un cable durante el aforo de ríos o diques profundos.

Figura 3. Molinete de copas



Fuente: BRIONES, Gregorio. *Aforo del agua en canales y tuberías*. p. 33.

Para realizar la medición de la velocidad de una corriente, el molinete se instala por debajo del espejo de agua, a una distancia de 60 % del tirante, y las

revoluciones de la ruedecilla se cuentan en un intervalo de tiempo previamente establecido. Existen molinetes que realizan la medición de la velocidad, por lo cual ya no es necesario verificar las revoluciones.

Figura 4. **Aforo con molinete**



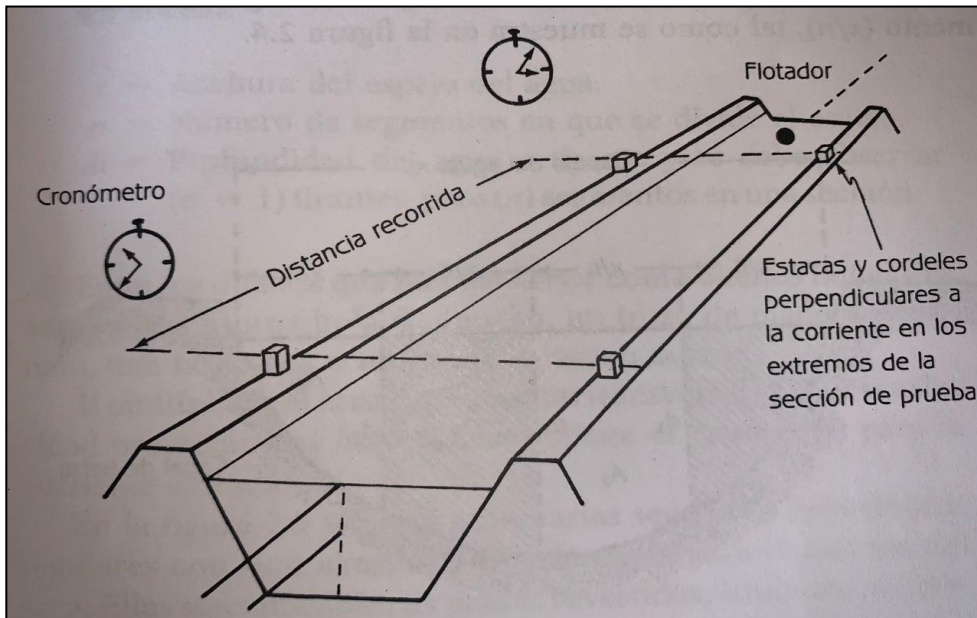
Fuente: elaboración propia.

1.2.3.2. Aforo con flotadores

El método de aforo por flotadores se utiliza para medir la velocidad del caudal, no el gasto directamente. Los flotadores proporcionan una medición aproximada de velocidad de flujo y se utilizan cuando no se requiere gran exactitud o cuando no se justifica la utilización de dispositivos de aforo más precisos.

Los flotadores miden la velocidad superficial del agua y se utilizan en el aforo de surcos, acequias, canales, ríos y diques. Durante la medición se registra el tiempo que tarda un pequeño flotador en recorrer una distancia conocida, marcada previamente sobre un tramo recto y uniforme. Dicho tramo es seleccionado para las observaciones a lo largo del ducto de prueba.

Figura 5. Método de aforo con flotadores



Fuente: BRIONES, Gregorio. *Aforo del agua en canales y tuberías*. p. 29

Figura 6. **Aforo con flotadores**



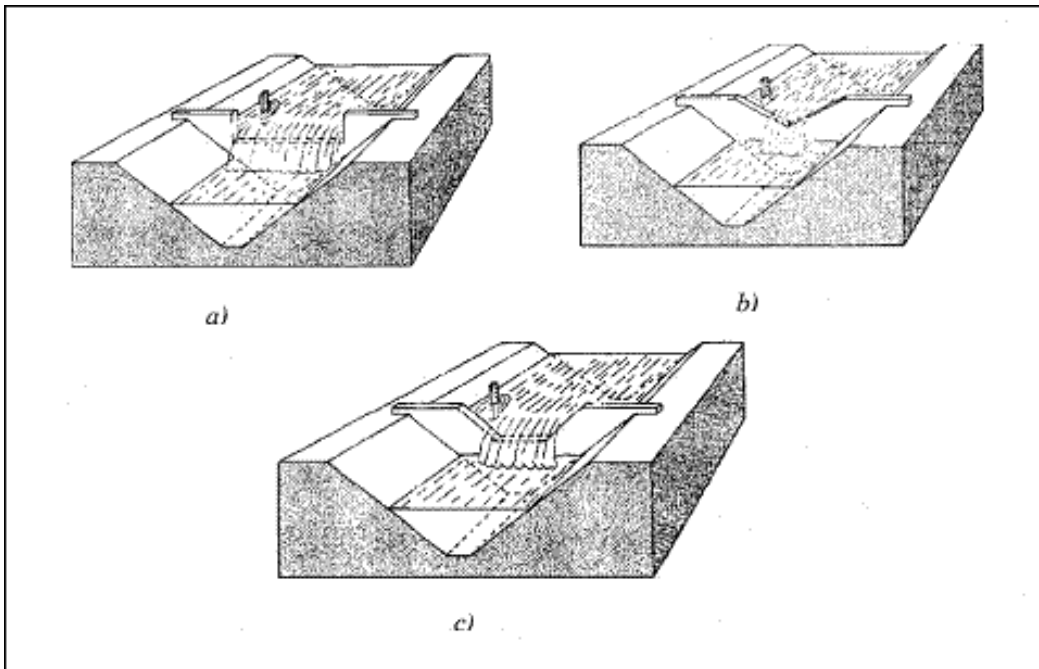
Fuente: elaboración propia.

1.2.4. Vertederos

El método de aforo por vertederos es el más utilizado para medir el caudal de agua en canales abiertos, por su fácil fabricación y porque para calcular el caudal simplemente es necesario conocer la carga de agua “h” que esté pasando por el vertedero en determinado momento y utilizar la ecuación que corresponda, según la sección del vertedero.

Según la forma a adoptar de acuerdo a la sección de la vena líquida que circule por este, los vertederos se clasifican en rectangulares, trapezoidales, triangulares, etc. (ver figura 6). Este tema se ampliará en el siguiente capítulo.

Figura 7. **Vertederos**



Fuente: *Cueva del ingeniero*. www.cuevadelcivil.blogspot.com. Consulta: 25 de mayo de 2019.

2. VERTEDEROS

2.1. Definición de vertederos

Un vertedero es una pared de forma regular, a través de la cual el agua puede fluir. Los vertederos usados para la medición del agua en canales y diques abiertos se pueden elaborar en placas de metal, madera, plástico o fibra de vidrio, mientras que los utilizados para el desagüe de excedentes en canales, estanques y presas, son generalmente estructuras permanentes, construidas de concreto o mampostería.

El borde sobre el cual se vierte el agua se denomina cresta del vertedero, la lámina de agua que fluye por encima de la cresta se denomina el manto, y la altura de agua que produce el derrame es conocida como la carga. El canal de llegada es el que conduce hasta el vertedero y la velocidad del agua en ese canal se denomina velocidad de acercamiento. Un vertedero se puede construir de distintas formas geométricas en su sección transversal.

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.

2.2. Clasificación de vertederos

Según el caudal de aforo o las características del lugar en donde será instalado, los vertederos se dividen en vertederos de pared delgada y

vertederos de pared gruesa, pueden tomar diferentes formas en su sección transversal, las cuales se describen a continuación.

2.2.1. Vertederos de pared delgada

La característica que identifica a estos vertederos es que la pared, no importando la forma del perfil, tiene una arista aguada. La utilización de vertederos de pared delgada está limitada generalmente a laboratorios, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros y sedimentos.

2.2.1.1. Secciones típicas

Los tipos más comunes son el vertedero rectangular, el triangular y el trapezoidal. 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.

2.2.1.2. Vertederos de sección rectangular

El vertedero rectangular es uno de los más sencillos para construir. Es un corte rectangular ubicado simétricamente en una placa delgada perpendicular a los lados, por este motivo es uno de los más utilizados. El principio hidráulico de este tipo de vertederos sirvió para el diseño de los otros tipos de vertederos.

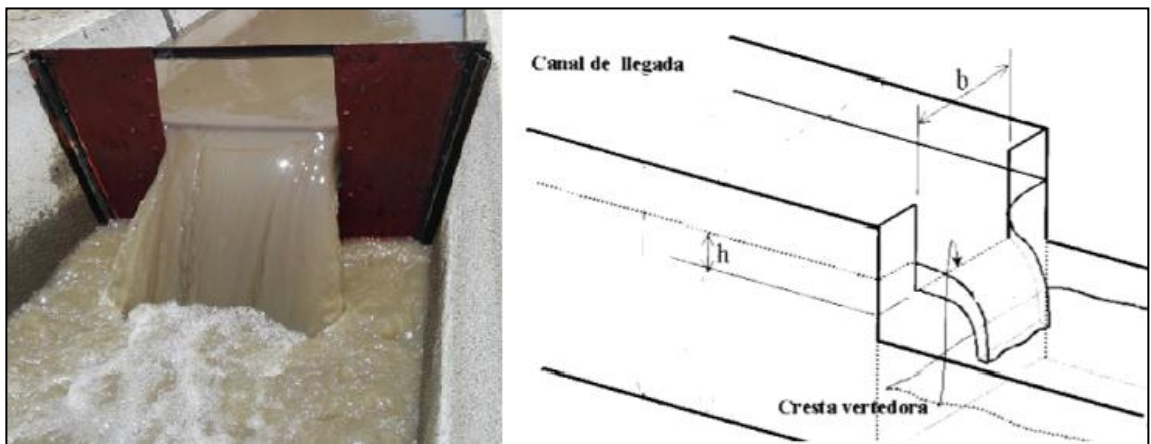
La fórmula básica para un vertedero rectangular es:

$$Q = 1,84 (b)(h^{3/2})$$

Donde:

- Q = caudal (m^3/s)
- b = base del vertedero rectangular (m)
- h = altura del flujo en el vertedero (m)

Figura 8. **Vertedero de sección rectangular**



Fuente: AGUILAR, Ariosto. *Vertedores*. p. 7.

2.2.1.3. **Vertederos de sección triangular**

El vertedero triangular, también conocido como vertedero de escotadura en "V", es más utilizado para la medición de caudales pequeños. Desde un punto de vista práctico es el vertedero indicado para el aforo de caudales menores a 120 (l/s).

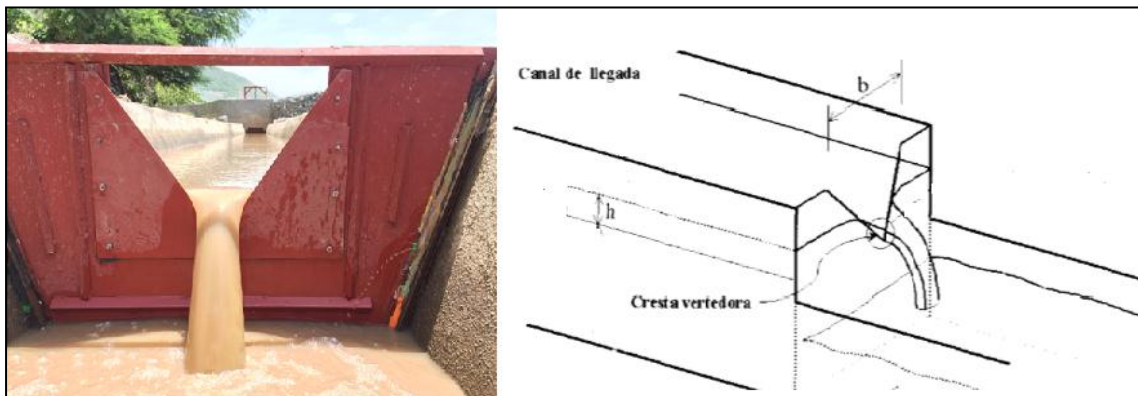
Según King, la fórmula de la sección típica para vertederos triangulares de 90° de apertura está dada por:

$$Q = 1,34 (h^{2,47})$$

Donde:

- Q = caudal (m^3/s)
- h = altura del flujo en el vertedero (m)

Figura 9. **Vertedero de sección triangular**



Fuente: AGUILAR, Ariosto. *Vertederos*. p. 8

2.2.1.4. **Vertederos de sección trapezoidal**

El caudal obtenido con un vertedero trapezoidal es igual a la suma de los obtenidos por un vertedero rectangular y uno triangular. A los lados de estos vertederos, por lo regular, se les da una inclinación de cuatro unidades verticales por cada unidad horizontal, es decir que cuentan con una pendiente igual a 1/4. La pendiente así obtenida es prácticamente suficiente para compensar el efecto de las contracciones laterales. Cuando se hace esto se dice que el vertedero es del tipo Cipolletti.

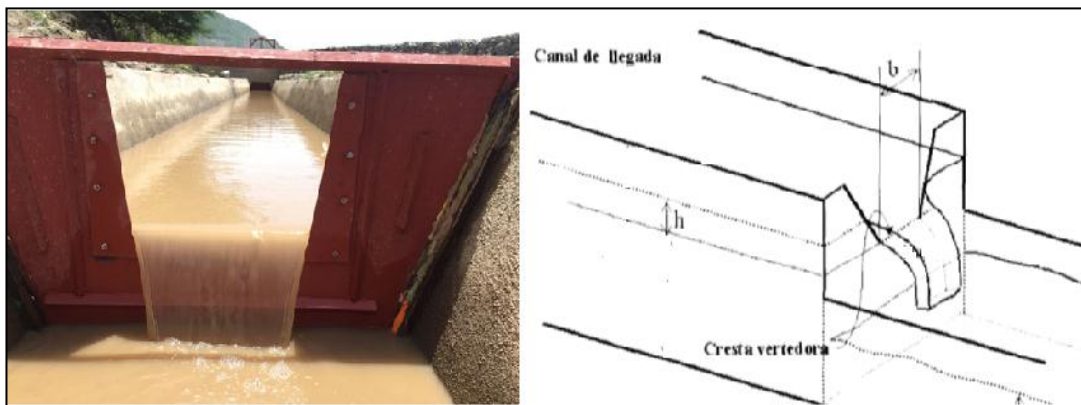
La fórmula de la sección típica para vertederos trapezoidales esta dada por:

$$Q = 1,859 (b) (h^{3/2})$$

Donde:

- Q = caudal (m^3/s)
- b = base vertedero (m)
- h = altura del flujo en el vertedero(m)

Figura 10. **Vertedero de sección trapezoidal**



Fuente: AGUILAR, Ariosto. *Vertederos*. p. 8

2.2.2. **Cuidado y mantenimiento de los vertederos**

Una estación de aforo con vertedero de pared delgada requiere de un mantenimiento como el siguiente:

- Limpieza del canal, eliminando los sedimentos.

- Verificar que la forma de la cresta del vertedero no pierda su perfil, para ello se debe limpiar con regularidad eliminando acumulaciones como el óxido, en caso de sufrir un deterioro es necesario cambiarlas.
- Verificar la nivelación del vertedero con regularidad.
- Si se tiene un vertedero rectangular sin contracciones, se debe cuidar antes de realizar cualquier lectura que los ductos de aireación estén limpios.
- Si el sistema de aforo tiene instalado un limnómetro se debe verificar que el sistema esté funcionando adecuadamente antes de la medición.

2.2.3. Ventajas y desventajas de los vertederos

Cuando se cuenta con una estación de aforo con pared delgada no se requiere de un gran equipo para ser puesta en marcha, lo que la convierte en un aforador versátil y de bajo costo. En comparación con otros equipos, los vertederos de pared delgada son de alta confiabilidad en relación a su precisión, y permiten estimar el error de medición antes de su instalación, además son de bajo costo en mantenimiento y tienen una durabilidad aceptable que solo depende del material con el que estén fabricados. Dado a lo anterior, la estación de aforo con vertederos de pared delgada es ideal para ser utilizada en la práctica por ser muy confiable y económica.

Pero en su implementación se tiene algunos problemas y estos principalmente son remansos que inducen a una red de canales y los pequeños niveles de ahogamiento que permiten aguas abajo de la cresta vertedora. Estos problemas se presentan con más regularidad en los distritos de riego, donde no se aceptan variaciones en los niveles de operación en los tramos de la red de

canales y se tienen flujos con ahogamiento alto. Estos problemas pueden causar que los vertederos sean utilizados solo para casos muy especiales en la red de canales o para estudios de gran precisión.

2.2.4. Ecuaciones para el cálculo de vertederos de pared delgada determinadas en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

En el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería se han realizado trabajos de investigación sobre el análisis del flujo en los vertederos de pared delgada de las secciones más comunes, habiéndose deducido modelos matemáticos para la estimación de caudales, los cuales fueron satisfactorios y mejoraron la precisión de las ecuaciones propuestas en diferentes manuales de hidrometría. Estos fueron validados en condiciones de laboratorio, pero es necesario validarlos en condiciones reales, para esto se instaló una estación de aforo en el canal de riego de la aldea San Agustín Acasaguastlan, El Rancho, y se compararon los resultados con los métodos de aforo de molinete y flotadores.

Los modelos matemáticos desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería son los siguientes:

- Vertederos con sección triangular

$$Q = 0,016(\Delta h^{5/2})$$

Donde:

- Q = caudal del vertedero triangular en l/s

- Δh = carga sobre la cresta en cm
- Vertederos con sección rectangular

$$Q = (1,7567(b^{-0,132})) * (0,0184(b - 0,2\Delta h)\Delta h^{1,5})$$

Donde:

- Q = caudal del vertedero rectangular
- b = base del vertedero
- Δh = carga sobre la cresta en cm
- Vertedero con sección trapezoidal

$$Q = (1,5095 * b^{-0,101}) * (0,0186 * b * \Delta h^{3/2})$$

Donde:

- Q = caudal del vertedero trapezoidal
- B = base del vertedero
- Δh = carga sobre la cresta en cm

En la ecuación de descarga para el vertedero triangular se obtuvo un coeficiente de descarga constante de $cd = 0,016$, válido para vertederos con ángulo de abertura desde 20° a 90° , teniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,995$.

En la ecuación de descarga del vertedero rectangular con 2 contracciones se corrigió la ecuación de Francis, donde el coeficiente de descarga quedó en

función del ancho de la cresta, siendo $cd=1.7567b^{-0.132}$, con un coeficiente de determinación $R^2= 0,991$.

En la ecuación de descarga del vertedero trapezoidal el coeficiente de descarga está en función del ancho de la cresta, siendo $cd = 1,5095 * b^{-0.101}$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,979$.

3. REALIZACIÓN DE LOS AFOROS

3.1. Selección de la obra para la instalación de las secciones de aforo

Se realizaron visitas a distintos canales de riego en diferentes departamentos del país, seleccionando como mejor opción para el desarrollo de los aforos el canal de riego de Aldea el Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso, con el objetivo de ayudar a los usuarios del canal instalando una estación hidrométrica para facilitar el uso del flujo.

Figura 11. Canal de riego



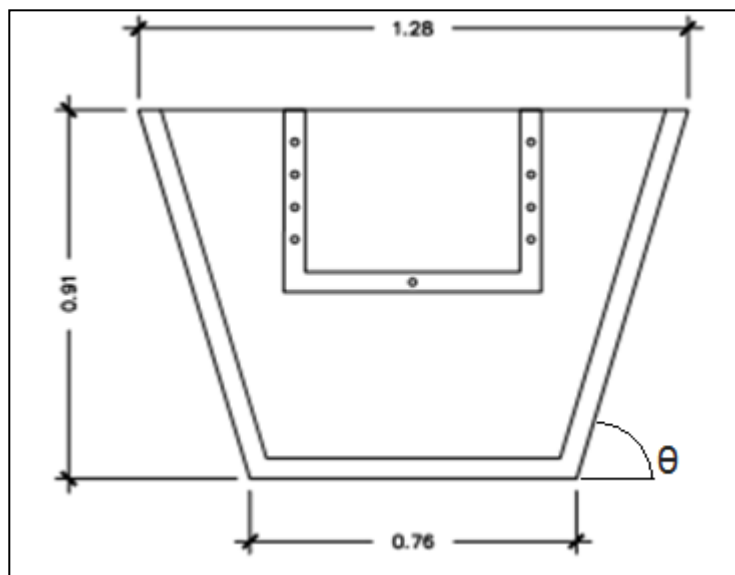
Fuente: elaboración propia.

3.2. Construcción y colocación de los vertederos

Para la construcción de los vertederos se eligió elaborarlos de metal, se elaboró un vertedero rectangular con placas adaptables de sección triangular y trapezoidal, que se instalaban con tornillos para hacer las mediciones.

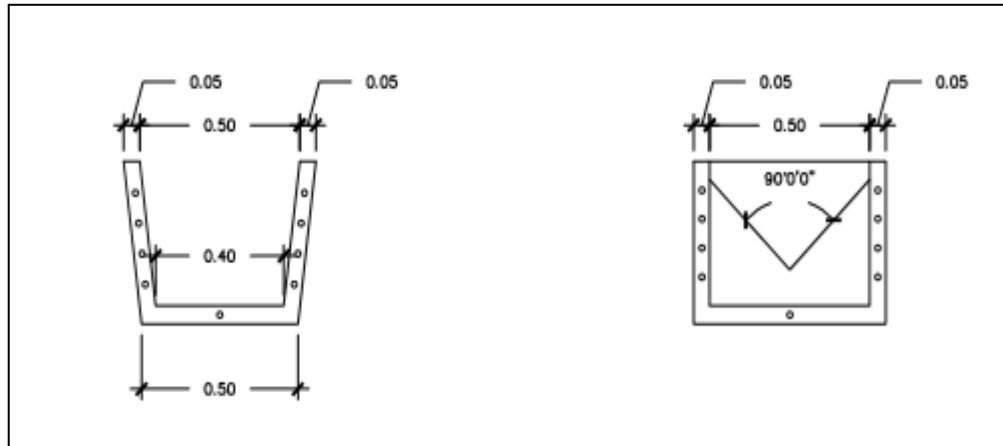
Se realizaron las mediciones necesarias al canal para verificar el lugar óptimo en donde se instalarían los vertederos, se fundió un riel en el canal, lo que permitió colocar y quitar el vertedero con más facilidad, y se verificó que no se presentara ninguna fuga que pudiera afectar los resultados. A un costado del vertedero se instaló en el canal un limnómetro para poder obtener las alturas del flujo.

Figura 12. **Diseño de vertedero rectangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 13. **Diseño de vertedero trapezoidal y vertedero triangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

3.3. **Aforos con vertederos**

Para realizar los aforos con vertederos se realizó el siguiente procedimiento:

- Abrir la compuerta de entrada de flujo y esperar a que se estabilice.
- Utilizando el limnómetro verificar el valor de la altura del nivel del vertedero (h_0).
- Abrir la compuerta del canal y con el limnómetro verificar la altura del flujo (h) para cada ensayo.

En cuanto al procedimiento para la determinación del caudal por vertederos:

Con el primer ensayo de vertedero triangular se obtuvieron los siguientes datos:

- $h_0 = 406 \text{ mm}$
- $h = 109 \text{ mm}$

- Obtener la carga sobre la cresta (Δh).
 - $\Delta h = h_0 - h$
 - $\Delta h = 406 - 109 = 297 \text{ mm}$

- Realizar el cálculo para obtener el gradiente de inclinación del canal (θ), porque el limnómetro no estaba en posición vertical, por lo que la lectura debe multiplicarse por el seno del ángulo de inclinación. El dato se obtiene con la sección del canal, por ser un canal trapezoidal tenía un ángulo de inclinación de $74,04^\circ$, y el gradiente de inclinación se obtiene de la siguiente forma:

$$\theta = \text{Sen}(74,04^\circ) = 0,9615$$

- Corrección de la carga sobre la cresta en $\text{cm}(\Delta h)$, y cambio de unidades para ser aplicada en la ecuación:

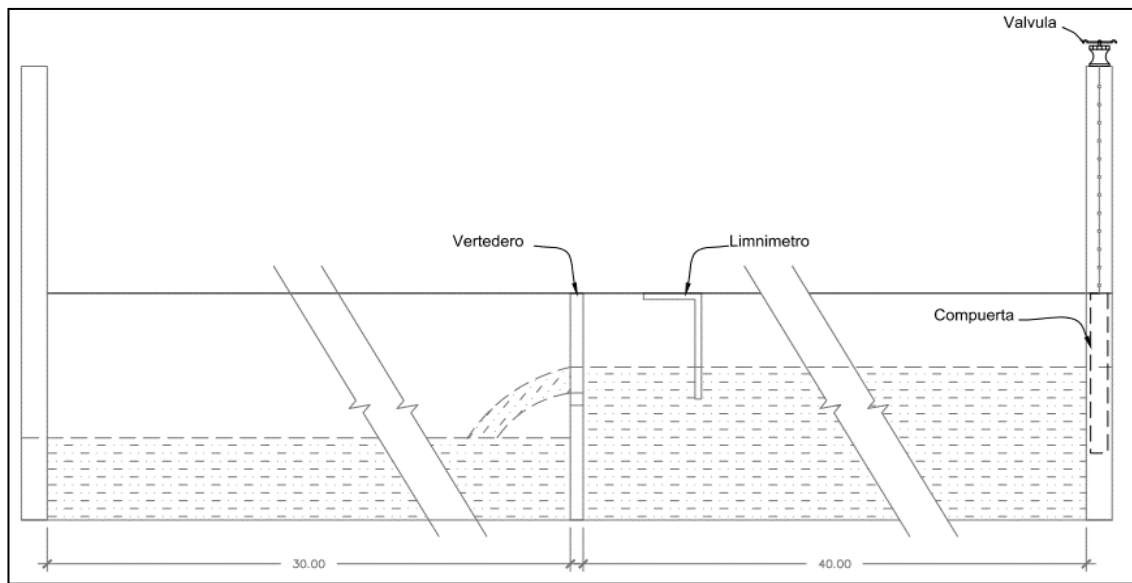
$$\Delta h = 297 * 0,9615 = 285,5655 \text{ mm}$$

$$\Delta h = 285,5655/10 = 28,5565 \text{ cm}$$

- Obtener el caudal, utilizando la ecuación, $Q = 0,016 (\Delta h^{5/2})$, obteniendo el caudal en litros por segundo.

$$Q = 0,016 (28,5565^{5/2}) = 69,7243 \text{ l/s}$$

Figura 14. Esquema de aforo con vertederos



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

3.4. Aforos con molinete

Para desarrollar los aforos con molinete se contó con un molinete tipo doble A de la marca comercial Rickly, y se realizó el siguiente procedimiento:

- Abrir la compuerta de entrada de flujo y esperar a que se estabilice.
- Medir la altura del espejo de agua (h_t).

- Colocar el molinete a una altura del 60 % del espejo de agua y sumergirlo en el flujo.
- Obtener los datos de la velocidad en dos puntos del vertedero.

En cuanto al procedimiento para la determinación del caudal por molinete:

Con el primer ensayo de vertedero triangular se obtuvieron los siguientes datos:

- $h_t = 0,38$ m
- $V_1 = 0,1970$ m/s
- $V_2 = 0,1978$ m/s
- Calcular la velocidad promedio de las velocidades obtenidas:

$$V_p = (V_1 + V_2) / 2$$

$$V_p = (0,1970 + 0,1978) / 2 = 0,1974 \text{ m/s}$$

- Calcular el área del flujo (A):

$$A = (0,76 + 0,286h_t)h_t$$

$$A = (0,76 + 0,286(0,38)) * (0,38) = 0,3301 \text{ m}^2$$

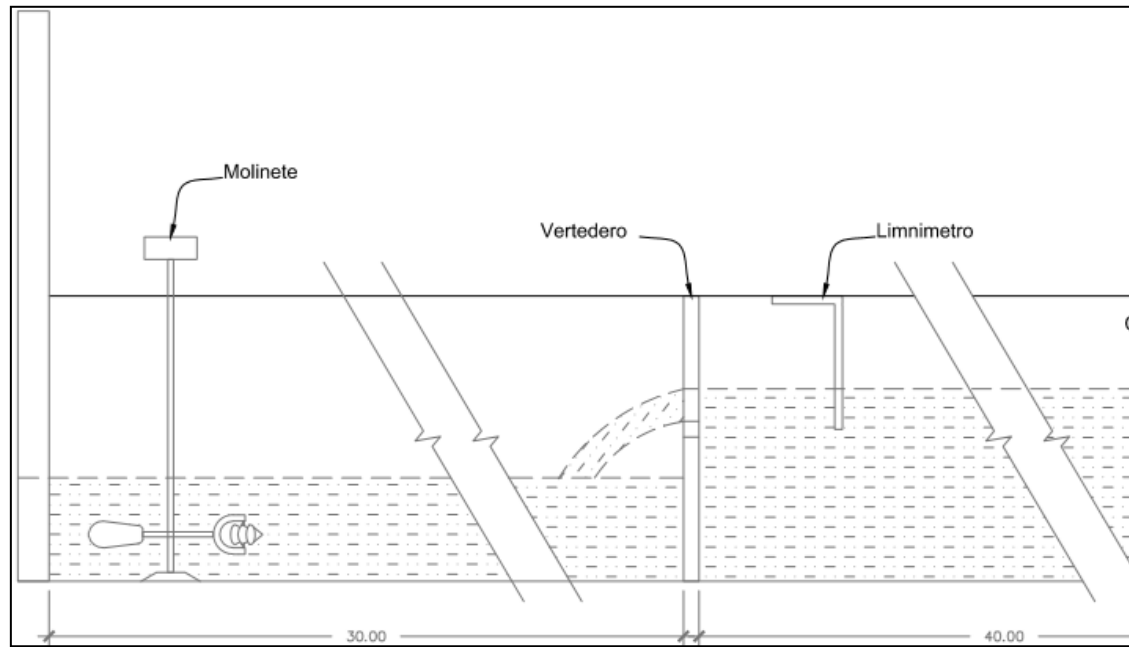
- Calcular el caudal y multiplicarlo por 1 000 para obtener el caudal en litros por segundo:

$$Q = V_p * A$$

$$Q = (0,1974) * (0,3303) = 0,0652 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = (0,0652) * (1\ 000) = 65,158 \text{ l/s}$$

Figura 15. **Esquema de aforo con molinete**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

3.5. **Aforo con flotadores**

Para realizar los ensayos por el método de flotadores se elaboró un flotador relleno una botella plástica a 1/3 de su volumen para darle mayor estabilidad. El procedimiento de los aforos es el siguiente.

- Abrir la compuerta de entrada de flujo y esperar a que se estabilice.
- Medir la altura del espejo de agua.
- Medir una distancia entre 2 puntos.
- Soltar el flotador unos metros antes del primer punto.
- Obtener los datos del tiempo que tarda el flotador en llegar del punto inicial al punto final.

- Obtener 2 tiempos para cada caudal.

En cuanto al procedimiento para la determinación del aforo con flotadores:

Con el primer ensayo de vertedero triangular se obtuvieron los siguientes datos:

- $h_t = 0,38$ m
- $t_1 = 33,25$ s
- $t_2 = 31,25$ s
- $d = 5$ m

- Calcular la velocidad promedio del flotador

$$V_p = \frac{(d/t_1) + (d/t_2)}{2}$$

$$V_p = \frac{(5/33,25) + (5/31,25)}{2} = 0,1552 \text{ m/s}$$

- Calcular el área del flujo (A):

$$A = (0,76 + 0,286h_t) h_t$$

$$A = (0,76 + 0,286(0,38)) * (0,38) = 0,3301 \text{ m}^2$$

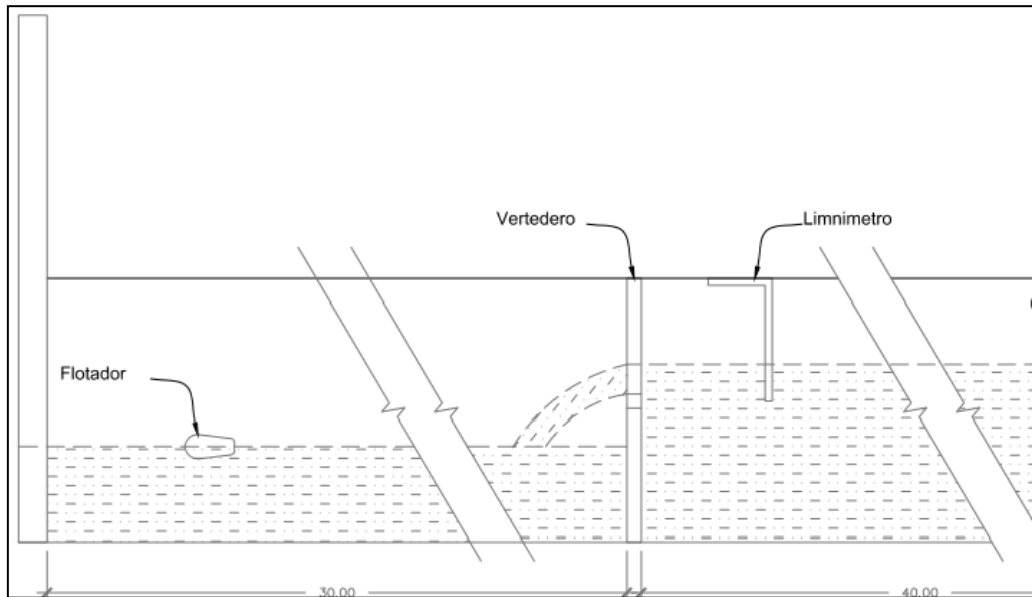
- Calcular el caudal y multiplicarlo por 1 000 para obtener el caudal en litros por segundo:

$$Q = V_p * A$$

$$Q = (0,1552) * (0,3301) = 0,0512$$

$$Q = 0,0512 * 1\ 000 = 51,22 \text{ l / s}$$

Figura 16. **Esquema aforo con flotadores**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación de los caudales por el método de molinete

En esta sección se encuentran los cálculos que se realizaron para obtener los caudales por el método de vertederos y molinete.

4.1.1. Vertedero triangular

Datos calculados:

Tabla I. Cambio de altura y velocidades para vertedero triangular

Nivel inicial = 406mm

Ensayo	Vertedero			Molinete			
	h(mm)	Δh (mm)	Δh (cm)	h_t (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_p (m/s)
1	109	297	28,5566	0,38	0,197	0,1978	0,1974
2	122	284	27,3066	0,37	0,184	0,191	0,1875
3	164	242	23,2683	0,355	0,143	0,1466	0,1448
4	182	224	21,5376	0,34	0,122	0,126	0,1240
5	210	196	18,8454	0,36	0,0834	0,086	0,0847

Fuente: elaboración propia.

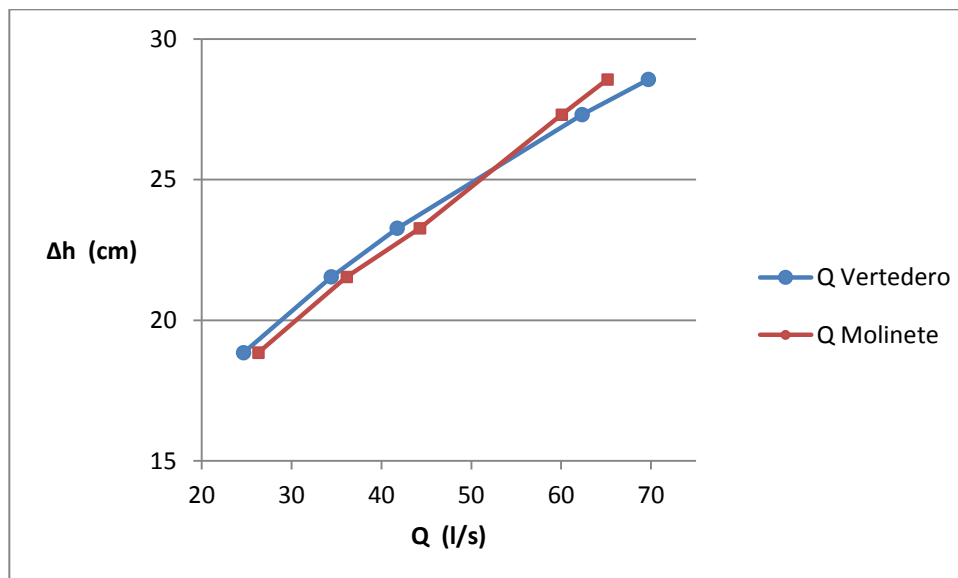
Resultados:

Tabla II. Comparación de caudales para vertedero triangular y molinete

Ensayo	Vertedero		Molinete			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V_p (m/s)	A (m ²)	Q (l/s)	
1	28,5566	69,7243	0,1974	0,3301	65,1614	6,54 %
2	27,3066	62,3432	0,1875	0,3204	60,0663	3,65 %
3	23,2683	41,7861	0,1448	0,3058	44,2861	5,98 %
4	21,5376	34,4440	0,1240	0,2915	36,1412	4,93 %
5	18,8454	24,6680	0,0847	0,3107	26,3134	6,67 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Comparación de caudales para vertedero triangular y molinete



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Vertedero rectangular

Datos calculados:

Tabla III. Cambio de altura y velocidades para vertedero rectangular

Nivel inicial = 408 mm

Ensayo	Vertedero			Molinete			
	h(mm)	Δh (mm)	Δh (cm)	h_t (m)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_p (m/s)
1	180	228	21,9222	0,38	0,277	0,2695	0,2733
2	210	198	19,0377	0,4	0,203	0,213	0,2080
3	240	168	16,1532	0,38	0,198	0,1679	0,1830
4	280	128	12,3072	0,36	0,128	0,1284	0,1282
5	314	94	9,0381	0,34	0,0868	0,0884	0,0876

Fuente: elaboración propia.

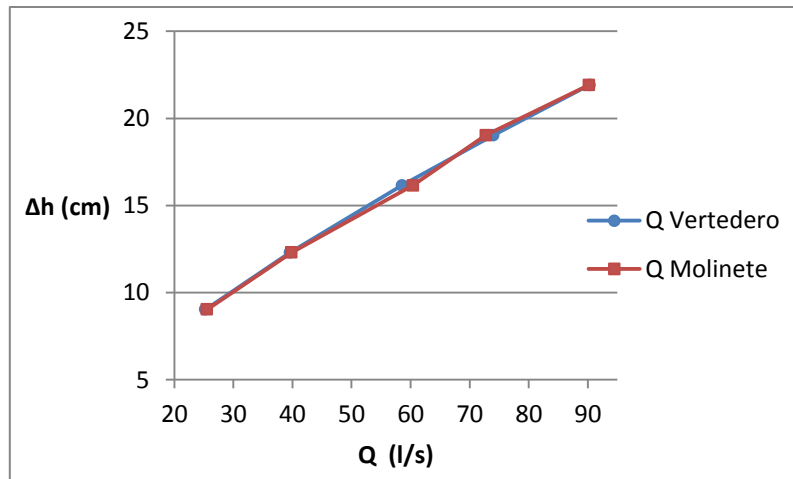
Resultados

Tabla IV. Comparación de caudales para vertedero rectangular y molinete

Ensayo	Vertedero		Molinete			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V_p (m/s)	A (m ²)	Q(l/s)	
1	21,9222	90,3028	0,2733	0,3301	90,1994	0,11 %
2	19,0377	74,0039	0,2080	0,3498	72,7501	1,69 %
3	16,1532	58,5614	0,1830	0,3301	60,3915	3,13 %
4	12,3072	39,5865	0,1282	0,3107	39,8273	0,61 %
5	9,0381	25,2555	0,0876	0,2915	25,5320	1,09 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Comparación de caudales para vertedero rectangular y molinete**



Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Vertedero trapezoidal

Datos calculados:

Tabla V. **Cambio de altura y velocidades para vertedero trapezoidal**

Nivel inicial = 392 mm

Ensayo	Vertedero			Molinete			
	h(mm)	Δh(mm)	Δh (cm)	h _t (m)	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V _P (m/s)
1	130	262	25,1913	0,44	0,257	0,2581	0,2576
2	143	249	23,9414	0,425	0,246	0,2574	0,2517
3	162	230	22,1145	0,41	0,2226	0,2242	0,2234
4	178	214	20,5761	0,4	0,2075	0,2083	0,2079
5	210	182	17,4993	0,38	0,163	0,1656	0,1643

Fuente: elaboración propia.

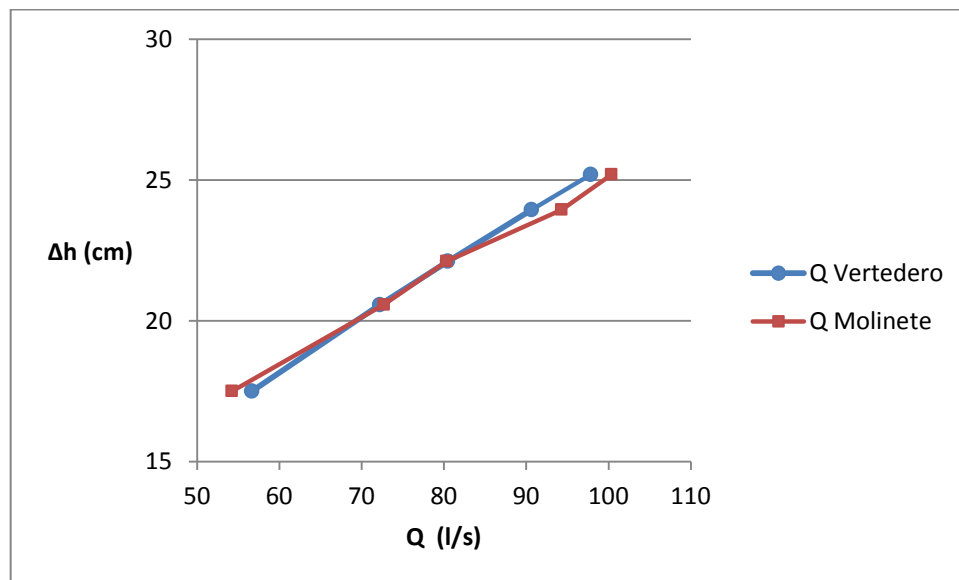
Resultados:

Tabla VI. **Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y molinete**

Ensayo	Vertedero		Molinete			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V_p (m/s)	A (m ²)	Q (l/s)	
1	25,1913	97,8419	0,2576	0,3898	100,3852	2,60 %
2	23,9414	90,6509	0,2517	0,3747	94,3016	4,03 %
3	22,1145	80,4757	0,2234	0,3597	80,3518	0,15 %
4	20,5761	72,2260	0,2079	0,3498	72,7151	0,68 %
5	17,4993	56,6474	0,1643	0,3301	54,2352	4,26 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y molinete**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Comparación de los caudales por el método de flotadores

En esta sección se encuentran los cálculos que se realizaron para obtener los caudales por el método de vertederos y flotadores.

4.2.1. Vertedero triangular

Datos calculados:

Tabla VII. **Cambio de altura y tiempos para vertedero triangular**

Nivel Inicial = 406 mm

Ensayo	Vertedero			Flotador		
	h(mm)	Δh (mm)	Δh (cm)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	V _P (m/s)
1	109	297	28,5566	33,25	31,25	0,1552
2	122	284	27,3066	33,5	28,58	0,1621
3	164	242	23,2683	41,5	43,57	0,1176
4	182	224	21,5376	59,45	43,25	0,0999
5	210	196	18,8454	57,65	52,03	0,0914

Fuente: elaboración propia.

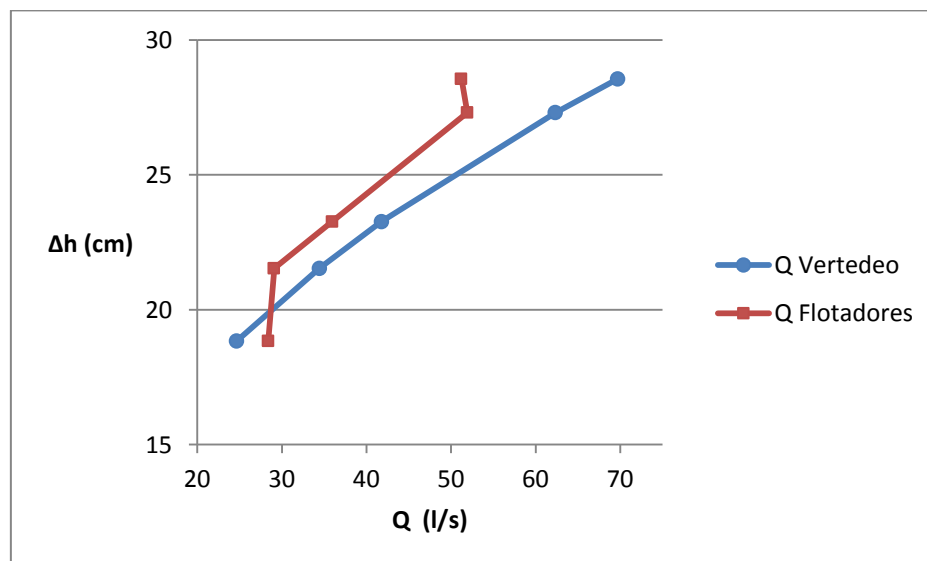
Resultados:

Tabla VIII. **Comparación de caudales para vertedero triangular y flotadores**

Ensayo	Vertedero		Flotadores			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V_p (m/s)	A (m ²)	Q (l/s)	
1	28,5566	69,7243	0,1552	0,3301	51,2273	26,53 %
2	27,3066	62,3432	0,1621	0,3204	51,9295	16,70 %
3	23,2683	41,7861	0,1176	0,3058	35,9732	13,91 %
4	21,5376	34,4440	0,0999	0,2915	29,1041	15,50 %
5	18,8454	24,6680	0,0914	0,3107	28,3993	15,13 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Comparación de caudales para vertedero triangular y flotadores**



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Vertedero rectangular

Datos calculados:

Tabla IX. **Cambio de altura y tiempos para vertedero rectangular**

Nivel inicial = 408 mm

Ensayo	Vertedero			Flotador		
	h(mm)	Δh (mm)	Δh (cm)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	V _P (m/s)
1	180	228	21,9222	19,09	19,8	0,2572
2	210	198	19,0377	21,81	20,9	0,2342
3	240	168	16,1532	27,64	28,62	0,1778
4	280	128	12,3072	37,62	38,24	0,1318
5	314	94	9,0381	52,71	54,23	0,0935

Fuente: elaboración propia.

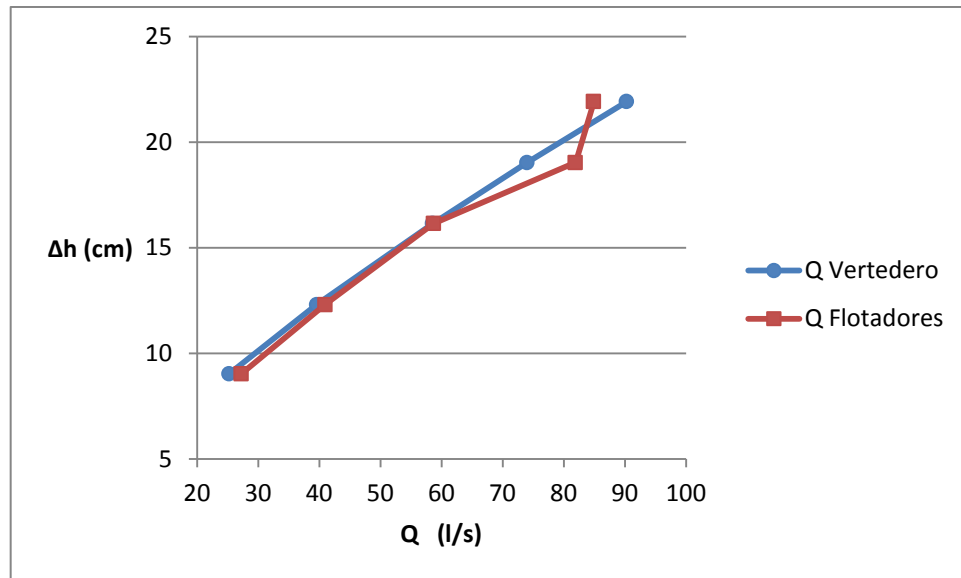
Resultados:

Tabla X. **Comparación de caudales para vertedero rectangular y flotadores**

Ensayo	Vertedero		Flotadores			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V _p (m/s)	A (m ²)	Q (l/s)	
1	21,9222	90,3028	0,2572	0,3301	84,9083	5,97 %
2	19,0377	74,0039	0,2342	0,3498	81,9290	10,71 %
3	16,1532	58,5614	0,1778	0,3301	58,6915	0,22 %
4	12,3072	39,5865	0,1318	0,3107	40,9552	3,46 %
5	9,0381	25,2555	0,0935	0,2915	27,2602	7,94 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comparación de caudales para vertedero rectangular y flotadores**



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. **Vertedero trapezoidal**

Datos calculados:

Tabla XI. **Cambio de altura y tiempos para vertedero trapezoidal**

Nivel inicial = 392 mm

Ensayo	Vertedero			Flotador		
	h(mm)	Δh (mm)	Δh (cm)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	V _P (m/s)
1	130	262	25,1913	17,25	16,91	0,2928
2	143	249	23,9414	18,03	17,59	0,2808
3	162	230	22,1145	19,09	19,81	0,2572
4	178	214	20,5761	22,69	22,41	0,2217
5	210	182	17,4993	24,28	23,88	0,2077

Fuente: elaboración propia.

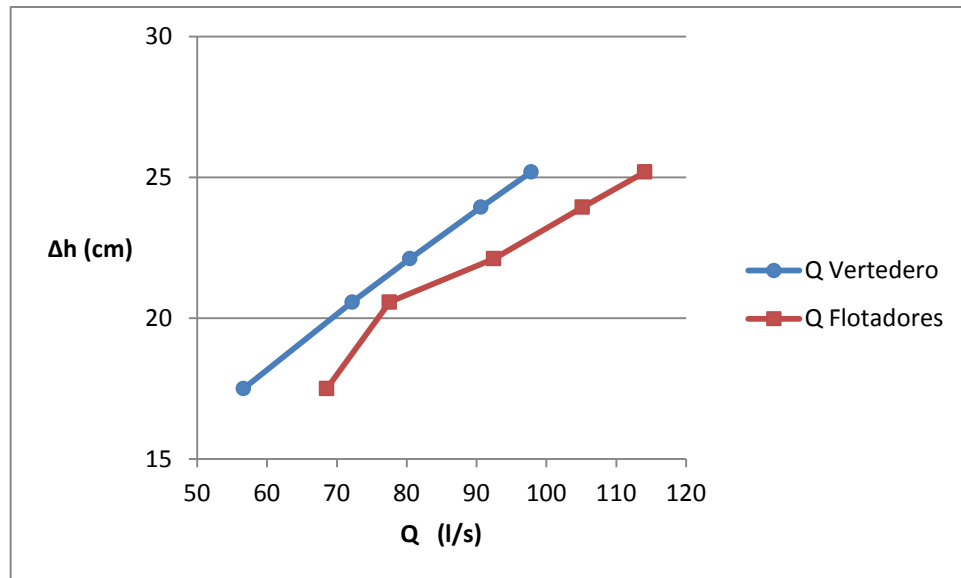
Resultados:

Tabla XII. **Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y flotadores**

Ensayo	Vertedero		Flotadores			Error porcentual
	Δh (cm)	Q (l/s)	V _p (m/s)	A (m ²)	Q (l/s)	
1	25,1913	97,8419	0,2928	0,3898	114,1125	16,63 %
2	23,9414	90,6509	0,2808	0,3747	105,1982	16,05 %
3	22,1145	80,4757	0,2572	0,3597	92,4935	14,93 %
4	20,5761	72,2260	0,2217	0,3498	77,5551	7,38 %
5	17,4993	56,6474	0,2077	0,3301	68,5468	21,01 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Comparación de caudales para vertedero trapezoidal y flotadores**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se compararon los caudales generados de los modelos matemáticos para la descarga en vertederos de pared delgada, desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, con el método de molinete y flotadores en el canal de riego de la Aldea El Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso.
2. Se realizó la comparación de los caudales de los vertederos y los caudales determinados con el método de molinete y se obtuvieron resultados similares, con porcentajes de error bajos, por lo que es posible concluir que los modelos desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería son precisos, dado que el método de aforo con molinete es uno de los más utilizados debido a la precisión del aparato.
3. Se realizó la comparación de los caudales de los vertederos, con los caudales determinados con el método de aforo por flotadores, y se obtuvieron mayores porcentajes de error debido a la falta de precisión que presenta este método, y, por la turbulencia en el flujo del canal, el desplazamiento del flotador no era completamente lineal.
4. Al comparar los caudales generados con los modelos matemáticos con los caudales determinados por el método de aforo de molinete y flotadores, se observa que el error porcentual es menor con el método de molinete, lo cual indica que la precisión de los modelos es alta debido a

que el molinete es un aparato que cuenta con una calibración precisa por parte de su fabricante.

5. Se construyó una estación de aforo en el canal de riego de la Aldea el Rancho, San Agustín Acasaguastlán, El Progreso, aplicando las normas y procedimientos correspondientes, con lo cual la comunidad que utiliza el canal será beneficiada para evitar desfogue del flujo en el canal y conocer el caudal que es necesario para abastecer a todos los usuarios.

RECOMENDACIONES

1. Después de abrir la compuerta de entrada se debe esperar a que el flujo se estabilice para realizar cada aforo.
2. Si el canal principal en donde se instala la estación de aforo es trapezoidal o de paredes inclinadas, se debe considerar el ángulo de inclinación de la pared donde se instalará el limnómetro porque la lectura deberá multiplicarse por el seno del ángulo de inclinación de la pared.
3. El canal de riego y la estación de aforo deben contar con mantenimiento y limpieza para un adecuado funcionamiento.
4. Que el cero de la escala del limnómetro coincida con la elevación de la cresta del vertedero en el caso de la sección rectangular y trapezoidal, y con el vértice en el caso de la sección triangular.
5. Instalar más estaciones de aforo con vertederos, dado que los caudales generados con los modelos deducidos en el laboratorio mejoran la precisión en la medición de caudales y con esto se logra el ahorro de agua y se controla el desperdicio.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR CHÁVEZ, Ariosto. *Vertedores*. México: IMTA. 2001. 23 p.
2. BRIONES SÁNCHEZ, Gregorio; GARCÍA CASILLA, Ignacio. *Aforo del agua en canales y tuberías*. México: Trillas. 1997. 92 p.
3. GARCÍA LOZANO, Faustino. *Medición del agua de riego*. España: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Hidráulicas, Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, España: 1977. 171 p.
4. GARCÍA VÁSQUEZ, Alexis Fernando. *Calibración de vertederos triangulares de pared delgada para distintos ángulos de abertura*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2015. 128 p.
5. GILES, Ronald V. *Mecánica de fluidos e hidráulica*: México: McGraw-Hill. 2006. 273 p.
6. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
7. MENCHÚ TUMAX, Santos Daniel. *Calibración de vertederos rectangulares de pared delgada con dos contracciones y de ancho*

variable. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2014. 171 p.

8. MIRANDA ESCOBAR, Julio Adrián. *Calibración de vertederos trapezoidales tipo Cipolletti de pared delgada de ancho variable*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 160 p.
9. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación, 2006. 462 p.
10. TE CHOW, Ven. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill. 2004. 667 p.
11. VILLÓN BEJAR, Máximo. *Hidráulica de canales*. Cartago, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica, 1995. 508 p.