

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA HIDRODINAMICA EN LA
DISIPACION DE ENERGIA DE CUATRO VERTEDEROS TIPO
LABERINTO Y UN VERTEDERO TIPO RECTANGULAR CON IGUAL
CAUDAL DE DESCARGA Y PENDIENTE.**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Línea de Investigación: Hidráulica

AUTOR:

Br. DINO ARMANDO REYES RONDO

Br. OCTAVIO ARTURO ROLDAN DIAZ

ASESOR:

Ms. ING. RICARDO ANDRES NARVAEZ ARANDA

TRUJILLO, 2018

Aprobación del Tutor:

Con conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, es grato poner a vuestra consideración, el presente trabajo de investigación titulado: “INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA HIDRODINAMICA EN LA DISIPACION DE ENERGIA DE CUATRO VERTEDEROS TIPO LABERINTO Y UN VERTEDERO TIPO RECTANGULAR CON IGUAL CAUDAL DE DESCARGA Y PENDIENTE.”, con el propósito de obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil.

El contenido de la presente tesis ha sido desarrollado considerando aplicación de conocimientos adquiridos durante la formación profesional en la universidad, consulta de fuentes bibliográficas especializadas y con la experiencia del asesor.

Ms. Ing. Ricardo Andrés Narváez Aranda

CIP: 058776

ASESOR

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

**“INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA HIDRODINAMICA EN LA
DISIPACION DE ENERGIA DE CUATRO VERTEDEROS TIPO
LABERINTO Y UN VERTEDERO TIPO RECTANGULAR CON IGUAL
CAUDAL DE DESCARGA Y PENDIENTE”**

JURADO

Ing. Fidel Germán Sagastegui Plascencia

CIP: 032720

PRESIDENTE

Ing. José Luis Serrano Hernández

CIP: 054464

SECRETARIO

Ing. Juan Manuel Urteaga García

CIP: 075985

VOCAL

Ms. Ing. Ricardo Andrés Narváez Aranda

CIP: 058776

ASESOR

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres Segundo Reyes y Juana Rondo quienes me dieron la vida, mi educación, su apoyo y sus consejos para ser un gran profesional y poder forjarme un futuro.

A mi amor Kareen Arias M. por su apoyo incondicional que día a día me demuestra para salir adelante.

A mis hermanos Aurea y esposo, Oscar y esposa, Sonia, Alexander y Dayana, por sus palabras de aliento y motivación para cumplir esta meta profesional.

A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, por su tiempo, soporte, así como la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional, quien sin su ayuda no hubiera podido hacer esta tesis.

DINO ARMANDO REYES RONDO.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

Dios, por permitirme despertar día a día, tener a mi ángel de la guarda al lado y una familia unida.

Mi ángel de la guarda, Elva Margarita, por acompañarme en todo momento y forjarme, sobre todas las cosas, como una persona de bien.

Mis padres, Francisco y Asunciona, por nunca perder la Fe en mí, ser el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional y mostrarme el camino hacia la superación. Sin ustedes, nada de esto fuese real.

Mis hermanos, Frank y Antonio, por brindarme su tiempo y cariño, ser mi fuente de motivación y enseñarme que, LOS ROLDANES, siempre estaremos unidos.

Mi padrino José, tío Tavo, tías Iris, Norma, Azucena y Maruja, por apoyarme desinteresadamente toda mi vida y también ser parte de mi formación personal. Gracias por ser partícipe de todos mis logros y sueños.

Walter y Mili, por estar siempre presentes en todos mis momentos y así, ser una parte importante en mi vida.

OCTAVIO ARTURO ROLDAN DIAZ

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios. A nuestro asesor Ms. Ing. Ricardo Andrés Narváez Aranda, por su tiempo y por sus pautas para la realización de la tesis.

A los jurados Ing. Fidel Sagastegui, Ing. José Serrano y Ing. Juan Urteaga, por darse el tiempo de revisar la tesis y por sus exhortaciones de ésta.

Por último, a nuestro gran amigo Ing. Heiner Sigüenza Corcuera por su desinteresado apoyo en el desarrollo de la presente tesis.

Los Autores.

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo principal realizar un estudio experimental de la disipación de energía de cuatro vertederos tipo laberinto y un tipo rectangular con igual caudal de descargar y pendiente en el canal de Pendiente Variable de la Universidad Privada Antenor Orrego.

Este estudio se realizó teniendo en cuenta dos etapas; la primera, que consiste en la correcta calibración de aforamiento en el canal de pendiente variable mediante mediciones volumétricas de los caudales reales; y la segunda, el análisis del comportamiento del flujo a través de los ensayos con estos prototipos.

Estas etapas han sido producto de una elaboración inicial de diseños de prototipos, basados en las referencias bibliográficas y en la finalización de los mismos mediante su construcción y ensayos en laboratorio.

Durante el desarrollo en laboratorio, se determinó que es posible usar vertederos tipo laberinto como disipadores de energía en situaciones donde el flujo recorre tramos con pendientes de 0% y 1%.

ABSTRACT

The main objective of this thesis was to carry out an experimental study of the energy dissipation of four labyrinth-type landfills and a rectangular type landfill with the same discharge and slope in the Variable Slope Channel of the Antenor Orrego Private University.

This study was carried out taking into account two stages; the first one, which consists of the correct calibration of the flow in the variable slope channel by means of volumetric measurements of the real flows; and the second, the analysis of the behavior of the flow through the tests with these prototypes.

These stages have been the product of an initial elaboration of prototype designs, based on the bibliographic references and the finalization of the same by means of their construction and laboratory tests.

During the development in the laboratory, it was determined that it is possible to use labyrinth-type landfills as energy dissipaters in situations where the flow crosses sections with 0% and 1% slopes.

PRESENTACION

La aplicación de diversos vertederos permite la evacuación del caudal cuando la presa está a su nivel máximo normal, a este fenómeno se le conoce como tránsito de ondas de avenida de presas.

Se debe de indicar que actualmente, debido a los cambios climáticos muchas presas en funcionamiento en el Perú y en otras partes del mundo han estado sujetas a una constante modificación en la mecánica del flujo inicial por muchos años, como por ejemplo el aumento del volumen de descarga y almacenamiento, en donde se destaca que uno de los problemas más notables es la sedimentación, siendo necesario la modificación de los mecanismos de control de la presa para mantener el volumen de almacenamiento sin modificar otros elementos de gran escala, por lo cual, se generó la necesidad de aumentar la longitud efectiva de descarga en los vertederos de los embalses.

La disipación de energía es importante porque permite que la entrega del flujo al cauce sea en condiciones normales y tranquilas, lo cual se logra con la disminución de velocidad, evitando la socavación de estructuras hidráulicas y las erosiones aguas abajo del cauce.

La disipación de la energía cinética puede lograrse aplicando diferentes medidas, a saber: generación de resalto hidráulico, impacto o incremento de la rugosidad.

La presente tesis consiste en el estudio experimental de la disipación de energía generada por cuatro vertederos tipo laberinto y un vertedero tipo rectangular, mediante el análisis del flujo dentro del canal de pendiente variable de la Universidad Privada Antenor Orrego.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
PRESENTACION	3
INDICE DE CONTENIDOS	4
CAPITULO I: INTRODUCCION.....	6
1.1. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION	7
1.1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	7
1.1.2. DELIMITACIÓN.....	13
1.1.3. APORTE DEL TRABAJO	13
1.1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.1.6. ALCANCE.....	14
1.1.7. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:	14
1.1.8. HIPÓTESIS	15
1.1.9. OBJETIVOS.....	15
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	17
2.1. VERTEDEROS.....	18
2.1.1. CONCEPTO DE VERTEDERO.....	18
2.1.2. FINALIDAD DE LOS VERTEDEROS	18
2.1.3. ELEMENTOS DE UN VERTEDERO.....	18
2.1.4. CRITERIO DE DISEÑO DE UN VERTEDERO.	19
2.1.5. VERTEDEROS TIPO LABERINTO.....	20
2.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA	31
2.2.1. DEFINICIÓN.....	31
2.2.2. EFECTO DE LA GRAVEDAD	31
2.2.3. CLASIFICACIÓN DEL FLUJO RESPECTO AL RÉGIMEN DE VELOCIDAD:	32
2.2.4. ENERGÍA ESPECÍFICA	32
2.2.5. CRITERIO PARA EL ESTADO CRÍTICO DE FLUJO	34
2.2.6. FENOMENOS LOCALES.....	36
2.2.7. ENERGIA ESPECÍFICA A GASTO CONSTANTE	36
2.2.8. SALTO HIDRÁULICO	37

CAPITULO III: METODOLOGÍA	50
3.1. MATERIAL Y METODOS	51
3.1.1. MATERIAL.....	51
3.1.2. MÉTODOS	51
3.1.3. EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.1.4. DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES	57
3.1.5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS.....	63
CAPÍTULO IV: DESARROLLO Y RESULTADOS	66
4.1. ALCANCES Y PROCEDIMIENTO	67
4.1.1. ALCANCES.....	67
4.1.2. PROCEDIMIENTOS	67
4.1.2.1. EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO	67
4.2. OBSERVACIÓN DE LOS ENSAYOS CON LOS VERTEDEROS	68
4.2.1. OBJETIVO Nº 01: CALIBRACIÓN DE ROTÁMETRO	68
4.2.2. OBJETIVO Nº 02: MEDICIONES PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE DESCARGA.....	73
4.2.2.1. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO TRIANGULAR	74
4.2.2.2. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO TRAPEZOIDAL.....	76
4.2.2.4. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO CIRCULAR	80
4.2.3. OBJETIVO Nº 03: MEDICIONES PARA DETERMINAR RESALTO HIDRÁULICO.....	82
4.2.3.1. VERTEDERO TIPO RECTANGULAR	82
4.2.3.2. VERTEDEROS TIPO LABERINTO	83
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	89
5.1. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE DESCARGA	90
5.1.1. SEGÚN FÓRMULA GENERAL PARA VERTEDEROS	90
5.1.2. SEGÚN FÓRMULA GENERAL CAUDAL – TEÓRICO	96
5.1.3. SEGÚN FÓRMULA PROPUESTA POR TULLIS – AMANIAN – WALDRON (1995).....	100
5.2. CÁLCULO Y DEMOSTRACIÓN DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA 	107
5.2.1. CÁLCULOS PARA DETERMINACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO.....	107
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES.....	122
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXOS.....	126

CAPITULO I: INTRODUCCION

1.1. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION

1.1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

“METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS DE LABERINTO”

Autor: Rodriguez Ramirez, Maria Asucena (2015)

Objetivo: Diseñar de forma eficiente una metodología para el diseño hidráulico de vertedores de laberinto.

Resumen: Las presas representan la principal infraestructura hidráulica que sirve de instrumento para el mejor aprovechamiento de las aguas superficiales disponibles en nuestro país, y debido a su capacidad de almacenamiento y regulación de diseño, permiten la disminución del riesgo por inundaciones de las poblaciones asentadas aguas abajo de la cortina que obstruye el flujo natural de los cauces.

La evaluación del estado físico de las presas es una tarea permanente, aunque las anomalías que se reportan de manera más recurrente se relacionan con el funcionamiento de los vertedores, disminuidos en su capacidad de desfogue, ya sea por obstrucción, por deterioro de las estructuras, o por asentamientos humanos en la zona de descarga.

De acuerdo con los registros disponibles sobre el año de construcción de las presas en México, existen algunas que han rebasado su vida útil y todavía continúan en operación. Por esta circunstancia, dicha infraestructura tiene una probabilidad más alta de sufrir un daño severo que ponga en riesgo su estabilidad, especialmente con la ocurrencia de un evento de precipitación y escurrimiento de magnitud considerable. Entre las condiciones más desfavorables de su estado físico actual, estas presas presentan problemas estructurales y de insuficiencia en sus obras de excedencias, particularmente en las compuertas de los vertedores, ya sea por falta de mantenimiento o rehabilitación, como son problemas de corrosión, o porque el tipo y tamaño de sus elementos se

definieron a partir de registros de información que no contemplaron eventos extraordinarios ocurridos después de la fecha de su construcción.

Es por ello que este trabajo de tesis se enfoca en la presentación de la metodología para el diseño hidráulico de vertedores de laberinto. Se pretende que dicha metodología sea una herramienta útil para actividades de diseño y su implementación en presas ya existentes, o en nuevas estructuras, tomando en cuenta que, como se explicará en capítulos posteriores, el vertedor de laberinto contribuye a la descarga de grandes volúmenes de agua.

La particularidad de este tipo de estructuras hidráulicas reside en la forma del vertedor, que vista en planta se asemeja a un “zig-zag”. Esta geometría especial incrementa la longitud del vertedor y aumenta la capacidad de descarga respecto a la de un vertedor recto convencional, ubicado en el mismo espacio y para igual carga hidráulica, lo que le permite adaptarse a un espacio disponible determinado.

El trabajo de tesis desarrollado se constituye de 4 capítulos:

En el capítulo 1 se menciona de manera general la importancia del funcionamiento adecuado de las obras de excedencias. Se describen los tipos de vertedores existentes, y se comentan las ventajas de utilizar vertedores tipo laberinto, puntualizando sobre sus características geométricas.

En el capítulo 2 se estudia el funcionamiento hidráulico del vertedor de laberinto. Se detalla sobre el acabado geométrico que presentan las paredes de un vertedor en su parte superior, considerando la influencia que esto tiene sobre la capacidad de descarga de la estructura; se discuten aspectos del fenómeno de ahogamiento e interferencia de la lámina vertiente; se revisan las consideraciones para el diseño de la rápida de descarga; se estudia la importancia del fenómeno de aireación en la formación de la lámina vertiente, y se incluye el desarrollo y aplicación de curvas de diseño, las cuales fueron obtenidas a partir de

experimentos realizados por diferentes investigadores, y su relación con la capacidad de descarga de los vertedores.

En el capítulo 3 se presentan las principales expresiones utilizadas para el diseño geométrico de los elementos que conforman a un vertedor de laberinto, así como la descripción de procedimientos sugeridos para su diseño eficiente. Adicionalmente, para complementar las recomendaciones y comentarios presentados en el cuerpo esta tesis, a manera de ayudas de diseño se incluyen ejemplos de aplicación de los modelos planteados.

Por último, el capítulo 4 está conformado por las conclusiones y comentarios finales relativos al cumplimiento de los objetivos definidos al inicio de este trabajo.

Conclusiones:

Los vertedores de laberinto son estructuras hidráulicas de elevada capacidad de descarga, con la ventaja adicional de que su implementación requiere de menor espacio para el desalojo de los gastos de diseño de las obras de excedencias.

Como estructuras de descarga, estos elementos resultan apropiados en aquellas obras hidráulicas donde se necesita restringir la sobreelevación de la lámina de agua, como pueden ser presas con posibilidades muy limitadas para la variación de su nivel de embalse.

Respecto al perfil de la cresta de los vertedores, de acuerdo con los trabajos de investigación consultados, el perfil tipo ogge resulta más eficiente en su capacidad de descarga, en comparación con el perfil de medio redondeo y un cuarto de redondeo.

El comportamiento de la lámina vertiente es un aspecto a considerar, pues se ha observado que el funcionamiento más adecuado de estos vertedores ocurre cuando la lámina vertiente es aireada.

Existen elementos de ayuda para el diseño de las características principales de los vertedores de laberinto, como son algunas hojas de cálculo elaboradas con las recomendaciones de investigadores prominentes en la materia, como Tullis, Falvey y Crookston. La

aplicación adecuada de estas ayudas ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad para el mejor diseño de estos vertederos.

Independientemente de las recomendaciones presentadas en la literatura especializada, las actividades de diseño de estos vertederos requieren del uso de prototipos para el estudio en detalle del comportamiento hidráulico de las descargas.

Relación con el Proyecto de Investigación: Nos permite almacenar y aplicar información actual sobre vertederos tipo laberinto en nuestro estudio experimental.

“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE APROXIMACIONES HIDRODINÁMICAS A LOS ÁPICES DE VERTEDEROS EN LABERINTO, EN SU COEFICIENTE DE DESCARGA”

Autor: Érises Sepúlveda Fabián Esteban (2013)

Objetivo: Es determinar la influencia de distintos largos de aproximaciones inclinadas (o hidrodinámicas) a los ápices de vertederos en laberinto, en su coeficiente de descarga, mediante la utilización de un modelo experimental a escala.

Resumen: Para la Rehabilitación de presas se ha hecho necesario, como solución práctica y de bajo coste, la implementación de vertederos en laberintos. Los cuales son estructuras hidráulicas que aumentan el volumen de descarga en estructuras de vertedero, que en el desarrollo de su funcionamiento la configuración de un elemento determina su eficiencia. Por consiguiente, se verificó el funcionamiento de estos vertederos de acuerdo a distintas configuraciones de aproximaciones hidrodinámicas en los ápices, para lo cual fue necesario desarrollar un modelo hidráulico para el cálculo empírico de los coeficientes de descarga según la ecuación de Tullis (1995); estimar la influencia de las distintas aproximaciones de ápices de acuerdo al volumen de flujo vertido, además de trazar gráficas de los coeficientes de descarga según las formas modeladas.

A su vez, el presente estudio hidráulico arroja como evidencia que es conveniente tener una aproximación inclinada hacia la cara frontal del ápice del vertedero, procurando tener una pendiente suave de entrada. Por otra parte, el desarrollo de la investigación deja la certeza que la implementación de las aproximaciones hidrodinámicas a los vertederos en laberinto, influye favorablemente en su coeficiente de descarga, aumentando significativamente los volúmenes de descarga.

Conclusiones:

El estudio hidráulico realizado demostró que la implementación de las aproximaciones hidrodinámicas a los vertederos en laberinto, influye favorablemente aumentando su coeficiente de descarga, y de esta forma mejorando significativamente los volúmenes de descarga.

El modelo de laboratorio, arrojó como evidencia que es conveniente tener una aproximación inclinada hacia la cara frontal del ápice, procurando tener una pendiente suave de entrada.

A nivel general, se puede concluir que a pesar de la eficiencia hidráulica que conlleva la incorporación de estos nuevos dispositivos ensayados en los vertederos en laberinto, no son necesariamente lo óptimos en términos de costos. Esto debido a las dificultades constructivas y al aumento significativo de materiales.

El estudio también demostró que el diseño vertederos en laberinto debe considerar la incorporación de estos elementos hidrodinámicos, pero se debe tener presente que no siempre se podrá utilizar una aproximación grande como la de largo 12 o 18 cm debido a que cada reservorio tiene sus dimensiones y a veces son muy limitadas, por lo cual es indispensable evaluar los factores específicos para cada proyecto.

Relación con el Proyecto de Investigación: Recopila información valiosa a tener en cuenta en el diseño de nuestros vertederos tipo laberinto.

“COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL ALIVIADERO DEL PROYECTO YACAMBU”

Autores: Medina Acosta, Lourdes Soriano Sifontes, Geraldine (1992)

Objetivo: Realizar un análisis del comportamiento hidráulico del aliviadero del proyecto Yacambu.

Resumen: En el presente trabajo especial de grado a través de estudios experimentales se conoce el comportamiento hidráulico de dicho aliviadero. Los ensayos se realizaron en un modelo a escala 1:45, construido en el laboratorio del Departamento de Hidráulica de C.V.G. Edelca en Macagua, con la finalidad de realizar los estudios requeridos para verificar el comportamiento hidráulico de esta estructura, tomando en cuenta que parte de las estructuras de concreto que conforman el aliviadero ya han sido construidas.

Conclusión: De la comparación realizada entre el análisis teórico según las ecuaciones seleccionadas y los resultados obtenidos en los ensayos sobre el modelo a escala reducida del aliviadero del Proyecto Yacambú, se deduce que no debe escatimarse esfuerzos en el estudio de aliviadero tipo abanico mediante modelos físicos, teniendo en cuenta la importancia que reviste el buen funcionamiento en la protección integral de un proyecto hidráulico, y dado que, efectos como aproximación del flujo al vertedero, comportamiento del flujo en un transición convergente y determinación de la sección de control, son característicos de cada proyecto y complejos de estudiar satisfactoriamente basados exclusivamente en la utilización de expresiones teóricas. Por esta razón se estima esencial la experimentación sobre un modelo físico para verificar el diseño de un aliviadero tipo abanico.

Relación con el Proyecto de Investigación: Básicamente es una guía de desarrollo de un estudio experimental de vertederos, la cual nos servirá como base para el desarrollo de nuestro estudio.

1.1.2. DELIMITACIÓN

El trabajo de investigación experimental se trabajó con 04 prototipos de vertedero laberinto y 01 prototipo de vertedero rectangular, que encajaron a medida y colocándose dentro del canal de pendiente variable de laboratorio UPAO. De esta manera se simuló un vertedero convencional en un canal a escala real para diferentes caudales y pendientes.

1.1.3. APORTE DEL TRABAJO

Este trabajo de investigación proporcionará una fuente de información para los alumnos de ingeniería civil que cursan las materias de Mecánica de Fluidos, Irrigaciones e Hidráulica. Además de brindar una visión experimental que ayudará a comprender el valor que asume la Disipación de Energía en el diseño de estructuras hidráulicas.

Además los prototipos construidos para realizar dicho trabajo experimental se obsequiarán al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego para ser empleados en futuras investigaciones.

1.1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los aspectos que generalmente merece especial atención en el diseño de obras hidráulicas es la disipación de la energía cinética que adquiere un flujo en su descenso. Esta situación se presenta en vertederos de excedencias, estructuras de caída, desfuegos de fondo, bocatomas, salidas de alcantarillas, etc.

La estructura disipadora de energía es una parte importante de la obra de excedencia que tiene por objeto disipar la energía cinética que el agua adquiere en su caída desde el vaso hasta un sitio adecuado en el fondo del cauce, donde no genere problemas de

erosión o socavación. Estas estructuras se diseñan para que el agua, que sale del canal de descarga, se aleje lo máximo posible, dentro de lo económico, de la cortina o de alguna estructura complementaria.

Sin embargo existe la posibilidad de usar vertederos tipo laberinto para generar disipación de energía en el flujo de caída. Usándolos en situaciones con características que se desarrollaron en la presente tesis.

El funcionamiento de estos vertederos de acuerdo a distintas formas geométricas hidrodinámicas, han dado lugar a que varios investigadores presenten expresiones empíricas unidimensionales o bidimensionales que se aplican para el diseño de los vertederos, dejando muchas dudas en el aprendizaje respecto al comportamiento de la mecánica de flujo y criterios de diseño, como son los coeficientes de descarga según la forma geométrica.

1.1.5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Influirá la geometría hidrodinámica de cuatro vertederos tipo laberinto y un tipo rectangular en la disipación de energía?

1.1.6. ALCANCE

El alcance del proyecto de investigación es a nivel académico que contribuye a la formación profesional del estudiante de Ingeniería Civil de la UPAO proporcionando experiencias y criterios hidráulicos para el diseño de estructuras hidráulicas.

1.1.7. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:

Justificación académica: El proyecto de investigación se justifica académicamente porque permitirá a los alumnos de ingeniería civil realizar prácticas experimentales de investigación en el canal de pendiente variable en el laboratorio de hidráulica de la UPAO, para calcular y analizar la disipación de energía, variables utilizadas para

diseño de canales naturales y artificiales, como otras estructuras hidráulicas. Logrando que el alumno pueda experimentar y comprender el planteamiento teóricos encontrados en las bibliografías.

La realización de esta investigación, tiene una gran precedencia para el uso del vertederos tipo laberinto en la influencia de su geometría hidrodinámica en la disipación de energía con flujos de igual descarga y pendiente en el canal de pendiente variable ubicado en el laboratorio de hidráulica UPAO, ya que mediante la investigación experimental tratara de prevenir o inhibir la posible socavación, erosión o daños a las estructuras hidráulicas diseñadas sin la necesidad de construir obras de excedencia.

1.1.8. HIPÓTESIS

La geometría hidrodinámica de cuatro vertederos tipo laberinto genera disipación de energía.

1.1.9. OBJETIVOS

1.1.9.1. Objetivos General

Realizar un estudio de la disipación de energía de cuatro vertederos tipo laberinto y un tipo rectangular con igual caudal de descargar y pendiente en el canal de Pendiente Variable de la Universidad Privada Antenor Orrego.

1.1.9.2. Objetivos Específicos

- Determinar los diferentes criterios para el diseño de cuatro vertederos tipo laberinto: rectangular, triangular, trapezoidal y circular, y un vertedero rectangular convencional.
- Diseñar y construir prototipos de los vertederos, antes mencionados, a escala del canal de pendiente variable de la

Universidad Privada Antenor Orrego, para el trabajo experimental.

- Realizar el trabajo experimental de aforamiento con un vertedero tipo rectangular para la calibración del rotámetro del Canal de pendiente variable de la Universidad Privada Antenor Orrego.
- Realizar el trabajo experimental de coeficientes de descarga con los cuatro vertederos tipo laberinto, antes mencionados.
- Realizar el trabajo experimental de resalto hidráulico con los cuatro vertederos tipo laberinto y vertedero tipo rectangular, antes mencionados.
- Comparar la disipación de energía producida por el uso de vertederos tipo laberinto y vertedero tipo rectangular.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. VERTEDEROS

2.1.1. CONCEPTO DE VERTEDERO

Se define como vertedero a un dispositivo hidráulico constituido por una pared perpendicular al flujo, a través del cual se hace circular el flujo. Hidráulicamente es un orificio que no está totalmente ahogado por el nivel de aguas arriba, de manera que la parte del orificio esta libre o sea es el equivalente de un orificio sin borde superior.

2.1.2. FINALIDAD DE LOS VERTEDEROS

Las finalidades de los vertedores pueden ser científicas y prácticas.

A.- Finalidades Científicas.- Pueden utilizarse como dispositivos de aforo o elementos de calibración de aforadores en laboratorios hidráulicos.

B.- Finalidades Prácticas.- Se emplea en la medición de caudales de pequeños cursos de agua (canales de pequeñas dimensiones) y conductos libres, así como en obras de control o de excedencias en presas de embalse y también aforo de grandes canales.

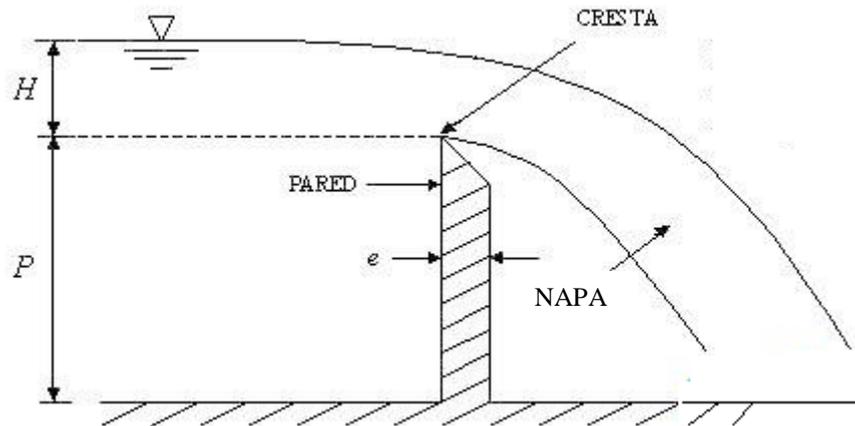
2.1.3. ELEMENTOS DE UN VERTEDERO

Los elementos de un vertedero son:

- **Cresta.-** Borde superior del vertedero
- **Napa.-** Vena líquida que fluye a través del vertedero.
- **Pared del Vertedero (P).-** Es la altura del vertedero.
- **Longitud del Vertedero (L).-** Es la longitud perpendicular del vertedero con respecto al flujo.
- **Carga sobre el Vertedero (H).-** Espesor del chorro medida

entre la superficie libre aguas arriba del vertedero a una distancia suficientemente grande para que no se manifieste el abatimiento de la napa en la cresta.

Figura 2. 1: Elementos de un vertedero



Fuente: Elaboración propia

2.1.4. CRITERIO DE DISEÑO DE UN VERTEDERO.

Un vertedero es seleccionado de acuerdo a requerimientos de descarga, diseño y utilidad de la presa. La capacidad del vertedero debe ser necesariamente igual aunque generalmente mayor al caudal máximo de descarga. El caudal máximo de salida corresponde a la creciente de diseño, término obtenido del aporte de la cuenca en eventos de alta ocurrencia de la precipitación.

De acuerdo a lo planteado por Delgado (2009), las crecientes en el aporte de la cuenca, son consideradas eventos aislados y ocasionales, y están relacionadas con una probabilidad de ocurrencia. Por ello, la determinación de estas se realiza por medio de un artificio matemático. Esta determinación se basa en seleccionar la capacidad del vertedero en relación al riesgo de colapso e importancia de la presa. La selección del riesgo posible está relacionada con el período de retorno (Tr), pues se evalúa la

ocurrencia de la crecida máxima en un período de mil años. También tiene importancia en la determinación del embalse variables como el impacto de una ruptura, el material que se usó para la construcción y la función del embalse.

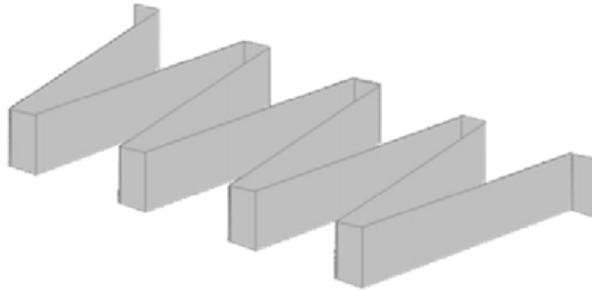
Por su parte Rodríguez (2010) hace énfasis que la ruptura de una presa, puede producir numerosos daños destacándose la posible pérdida de vidas humanas, y daños aguas abajo a la infraestructura y tierras cultivables, entre otros. Esto se produce por el daño directo ocasionado por la ruptura, en donde el efecto de su acción es inmediato. Por otra parte, el factor bajo el cual se determina la capacidad de un vertedero, es aquel asociado al material de construcción de la presa, ya que una presa de concreto permite un mínimo vertido a través de la cresta de la presa, sin que peligre su infraestructura. Esta acción no es permitida por una presa de tierra, bajo ningún punto de vista, debido a la erosión que esto provocaría sobre la presa. Finalmente la función del embalse es un factor importante, dado que su ruptura puede alterar la función que lo hace indispensable, ya sea en el suministro de energía, agua, riego; o en el caso de control de inundaciones, la interrupción de esta función.

2.1.5. VERTEDEROS TIPO LABERINTO

2.1.5.1. DEFINICIÓN

Un vertedero en laberinto es un aliviadero que se presenta en forma de “zigzag” vista en planta a lo largo de su longitud de descarga (Figura I.1), toma esta geometría con el objeto de aumentar la longitud de descarga con respecto al canal o la anchura del aliviadero, esto producirá mayor capacidad de flujo de la estructura sobre un vertedero.

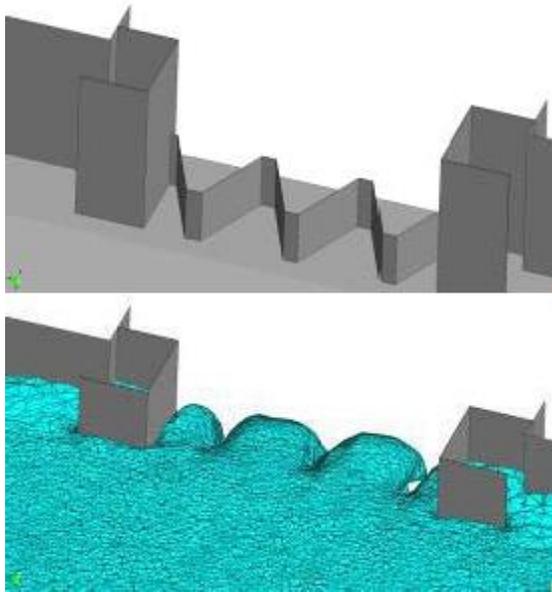
Figura 2.2: Ilustración de la estructura de un vertedero tipo laberinto



Fuente: Delgado (2009)

Esta estructura al presentar esta configuración posee una mayor longitud de descarga. En consecuencia, el caudal descargado es mayor, en comparación a un vertedero de cresta viva con el mismo ancho de canal. La utilización de un vertedero de laberinto permite en algunos embalses existentes el incremento de su nivel de aguas normales, manteniendo el mismo nivel de aguas máximas. Como consecuencia del aumento en el nivel de las aguas normales, se aumenta el volumen útil del embalse. Esto ocurre al descargar mayores caudales con un nivel de carga hidráulica menor.

Figura 2.3: Esquema de vertedero laberinto



Fuente: Balairón Pérez Luis. Avances en investigación en materia de seguridad hidráulica de presas

2.1.5.2. USO DEL VERTEDERO TIPO LABERINTO

Sus funciones son el control de los niveles del agua en las obras hidráulicas cuando estos niveles superan los máximos de explotación ordinaria, mejora la capacidad de descarga en las presas, también se las usa como estructura de protección de canales y plantas hidroeléctricas, como disipador de energía aplicada para controlar la calidad de agua por aireación del flujo.

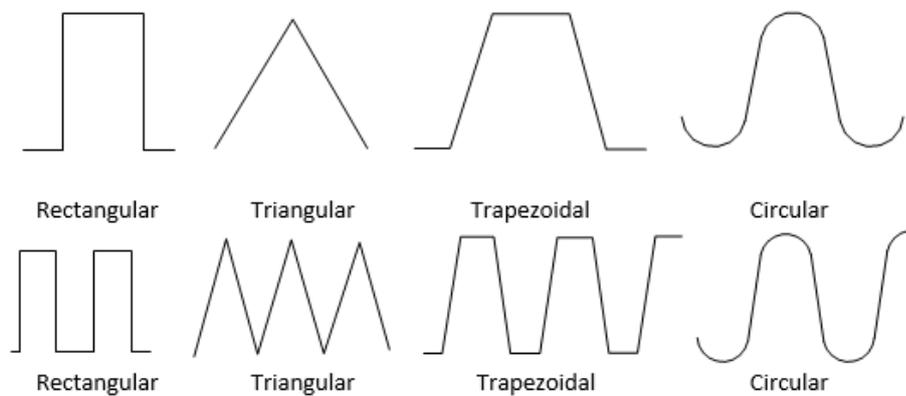
2.1.5.3. CICLO DE VERTEDERO TIPO LABERINTO

Según Khatsuria (2004), un vertedero tipo laberinto está conformado por varios ciclos. Un ciclo es una secuencia de paredes y ápices que forman una secuencia similar a una onda. El tipo de ciclo determina el tipo de vertedero laberinto. Las formas más comunes se observan en la figura 2.3.

2.1.5.4. GEOMETRÍA DE VERTEDEROS TIPO LABERINTO

Los tipos de vertedero laberinto más comunes son el rectangular, triangular y trapezoidal. El vertedero rectangular está formado por paredes rectangulares dispuestas de manera perpendicular entre ellas. El tipo triangular dispone las paredes de manera angular semejando un triángulo. El tipo trapezoidal dispone las paredes en una formación semejando un trapecio.

Figura 2.4: Tipos de ciclo y vista en planta de vertederos en Laberinto

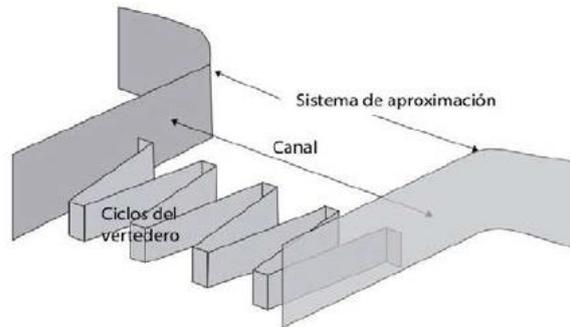


Fuente: Khatsuria (2004b)

2.1.5.5. ELEMENTOS DE UN VERTEDERO TIPO LABERINTO

Los vertederos tipo laberinto están compuestos por tres grupos de elementos. Desde aguas arriba hasta aguas abajo, están los dispositivos de aproximación al canal de vertedero y finalmente todos los elementos del vertedero (ciclos). Un ciclo de vertedero está formado por distintas longitudes y ubicaciones, las paredes se dividen en paredes laterales y ápices aguas arriba y ápices aguas abajo. Las diferentes partes que conforman los ciclos y la cantidad de estos, influyen en el comportamiento de descarga del aliviadero.

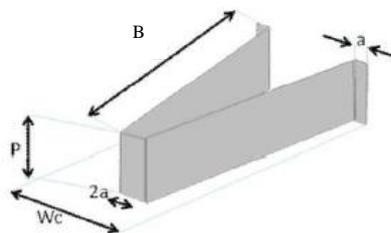
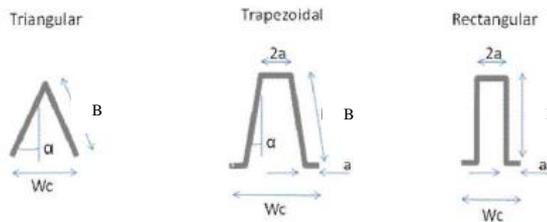
Figura 2.5: Ilustración de la estructura de un vertedero tipo laberinto.



Fuente: Elaboración propia

En un vertedero laberinto (trapezoidal), los ápices ubicados aguas arriba y aguas abajo se denominan “ $2a$ ”, las paredes laterales se denominan “ B ”, el ancho de ciclo se denomina “ Wc ” y la altura sobre del vertedero se denomina “ P ”. Existe un ángulo “ α ”, medido desde el eje del vertedero hasta la pared.

Figura 2.6: Ilustración de ciclos de vertedero tipo laberinto



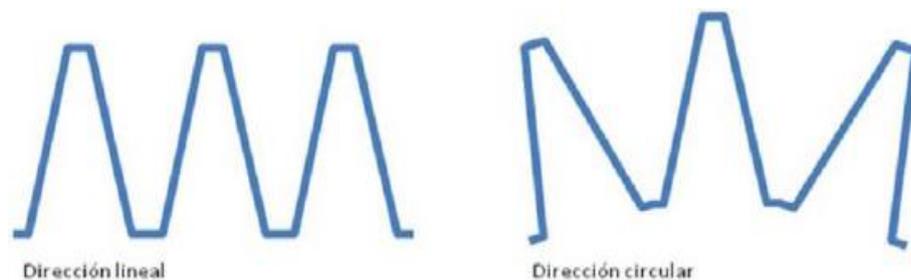
Fuente: Delgado (2009)

2.1.5.6. DIRECCIÓN DEL EJE DEL VERTEDERO TIPO LABERINTO

Tulis et al (1995) plantea que la dirección del eje de un vertedero es aquella orientación que indica la ordenación de los ciclos de un vertedero tipo laberinto, según su vista en planta. La implementación de vertederos tipo laberinto utiliza geometrías de ejes diferentes, por lo que la dirección del eje del vertedero es particular para cada estructura.

La variación de la dirección se realiza para aumentar la longitud del vertedero o incorporar más ciclos al vertedero, y por consecuencia el caudal de alivio mejora utilizando el mismo ancho disponible. Las direcciones utilizadas pueden ir desde un trazado recto a una curva o la combinación de ambas. Figura 2.6.

Figura 2.7: Vista en planta de dos direcciones de un vertedero tipo laberinto



Fuente Delgado 2009

2.1.5.7. VENTAJAS CONSTRUCTIVAS DE LOS VERTEDEROS TIPO LABERINTO

La implementación de estos dispositivos genera una serie de ventajas que van más allá de lo funcional, las facilidades constructivas y los bajos requerimientos del material utilizados. Cabe mencionar que la utilización de encofrados sencillos y

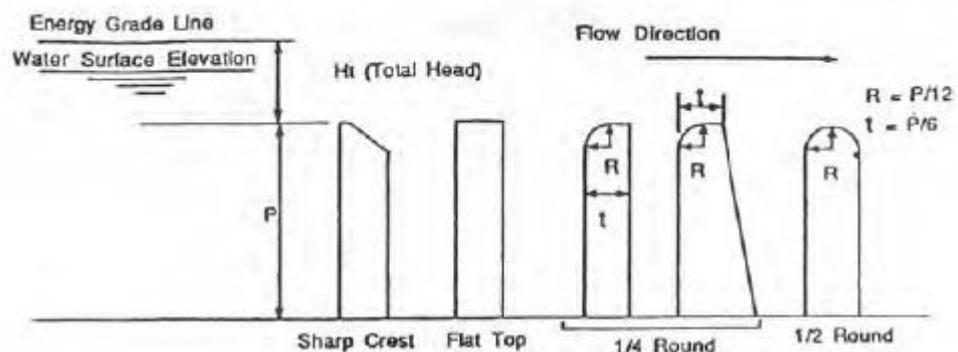
factibles de realizar sin necesidad de complicadas formas o acabados es parte de estos mecanismos.

2.1.5.8. PERFILES EMPLEADOS EN VERTEDERO LABERINTO

Los perfiles de cresta son el acabado geométrico que poseen las paredes del vertedero en su parte superior, y son de relativa importancia, considerando que el diseño de estos influye en el coeficiente de descarga del vertedero. En una vista de perfil de la pared del vertedero, se pueden observar las dimensiones que este componente posee en el área ubicada en la cima, que se denomina cresta. Este acabado de la pared de vertedero estará en contacto con el caudal circulante pues de un lado de este, se encontrara el volumen del flujo a descargarse; y del otro lado, la lámina de la descarga. La importancia que debe tener este acabado es muy relevante pues influye sobre la descarga.

Se busca por medio de un perfil de cresta adecuado hacer más eficiente la descarga, evitando que el diseño de la pared de vertedero se vuelva más complicado.

Figura 2. 8: Perfiles de la cresta de vertederos laberinto

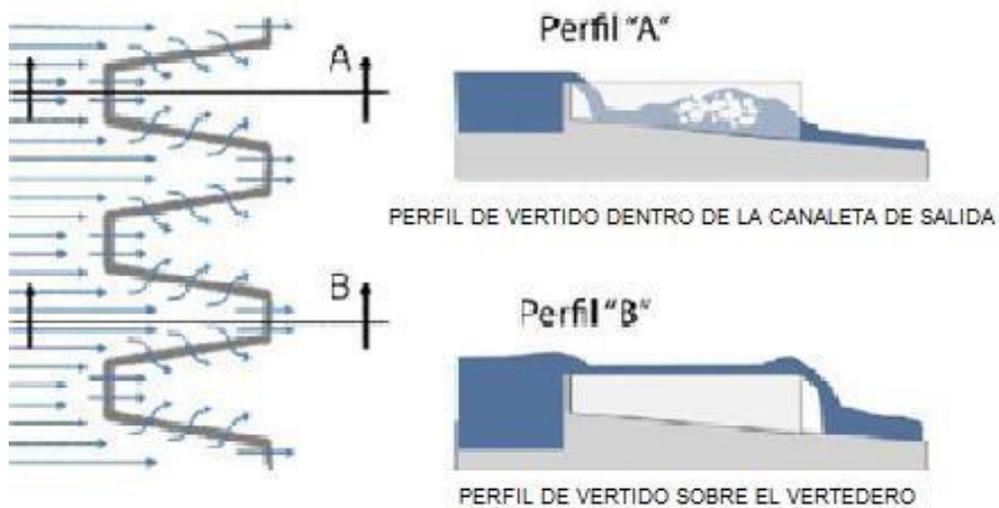


Fuente: J. Paul Tullis, Amanian y Waldron (1995)

2.1.5.9. FLUJO EN EL VERTEDERO LABERINTO

En vertederos laberinto el flujo es tridimensional y no bidimensional, por lo que las líneas de corriente tienen trayectorias alternativas y variantes en tres dimensiones.

Figura 2.9: Perfiles de vertido sobre el vertedero laberinto



Fuente: Erices Sepúlveda Fabián. Valdivia – Chile

Según Khatsuria (2004b), un vertedero de laberinto puede presentar segmentos de descarga con diferente carga hidráulica y volúmenes de caudal diferentes por la aproximación del flujo.

En los vértices de las paredes del aliviadero, se pueden presentar situaciones de descarga en varias direcciones.

En la situación de descarga del flujo puede producirse que algunos segmentos tengan que descargar mayores cantidades de caudal que otros. El flujo que se descarga por el ápice del vertedero tiende a producirse como si se tratase de un vertedero de cresta viva. Pero en el caso de la pared en posición angular con respecto a la dirección del flujo, como ocurre en el tipo trapezoidal, la longitud de descarga se incrementa y el fluido tiene mayor espacio para descargar. Esto trae como consecuencia que los valores de la

carga de agua se incrementen en los trayectos perpendiculares al flujo y disminuya en los trayectos angulares.

La descarga descrita de los vertederos de laberinto muestra una evolución en el vertedero trapezoidal a partir de elementos geométricos del vertedero triangular y rectangular. Esta implementación del tipo trapezoidal ocurre para minimizar los inconvenientes producidos por la interferencia de la descarga.

2.1.5.10. FLUJO A LA SALIDA DEL VERTEDERO

El flujo de salida del laberinto en el conducto aguas abajo debe ser supercrítico. Si esto no es posible el laberinto debe estar diseñado de tal manera que la cabeza proporción máxima de cresta permanece en la región aireada.

2.1.5.11. COEFICIENTE DE DESCARGA DE UN VERTEDERO TIPO LABERINTO

Como una de las formas más comunes de describir el funcionamiento de los vertederos de laberinto es mediante el coeficiente de descarga, y en base a estos se han realizado comparaciones y estimaciones de parámetros constructivos. Tullis (1995) especifica que los parámetros más significativos la magnitud del caudal de descarga son la geometría del dispositivo de descarga y la velocidad del flujo. En un vertedero, el término numérico que describe el volumen de descarga, y que se basa en la geometría, es el coeficiente de descarga.

Cassidy (1985) demostró que cualquiera de los valores de profundidad para la carga hidráulica de la descarga aguas arriba del vertedero, H_1 , puede ser usado para determinar el coeficiente de descarga. Pero este autor considera que se deben seleccionar

cuidadosamente los puntos de medición de las profundidades aguas arriba en la aproximación, para crear una base de datos óptima seleccionados para la elaboración de la gráfica de los coeficientes de descarga. Esta última afirmación de Cassidy, es fundamental en los trabajos experimentales, dado que es un criterio que se aplica a la determinación del coeficiente de descarga. Esto viene dado por indicaciones de otros autores como Tullis (1995), quien desarrolló sus conclusiones gráficas bajo el uso de este criterio. También bajo este punto se indica el principio de la medición de caudales aguas abajo del canal del canal rápido del aliviadero, en modelos y prototipos, asumiendo que el caudal que transita por el vertedero es igual al caudal que transita por la aproximación.

Tullis (1995) expresó sus conclusiones gráficas relacionando el coeficiente de descarga con el coeficiente H_o/P . Este autor desarrolló una serie de montajes experimentales trabajando con una ecuación sobre vertederos de laberinto. Esta ecuación incorpora términos como la aceleración de la gravedad y su relación entre las características del vertedero.

$$Ql = Cd * L * \frac{2}{3} * \sqrt{2 * g * H^3}$$

Donde Ql es el caudal de descarga del vertedero en laberinto, Cd el coeficiente de descarga, L la longitud efectiva (total), g aceleración de gravedad y H la carga hidráulica.

Una de las cosas más importantes en una investigación del UWRL (Laboratorio de Investigación del Agua en Utah) fue determinar el valor del coeficiente de descarga Cd para un rango completo de variables estudiadas. Los coeficientes de descarga son para vertederos con ángulos entre 6° y 35° (Armanian 1987; Baasiri et; reporte no publicado, 1992; Tullis 1993; Waldron 1994).

$$C_d = a + b \left(\frac{H}{P}\right) + c \left(\frac{H}{P}\right)^2 + d \left(\frac{H}{P}\right)^3 + e \left(\frac{H}{P}\right)^4$$

Tabla 2.1: Valores de coeficientes para el cálculo de C_d en función del ángulo α .

α (°)	a	b	c	d	e
6	0,49	-0,24	-1,2	2,17	-1,03
8	0,49	1,08	-5,27	6,79	-2,83
12	0,49	1,06	-4,43	5,18	-1,97
15	0,49	1	-3,57	3,82	-1,38
18	0,49	1,32	-4,13	4,24	-1,5
25	0,49	1,51	-3,83	3,4	-1,05
35	0,49	1,69	-4,05	3,62	-1,1

Fuente: Tullis, Amanian y Waldron (1995)

Taylor (1970) llevó a cabo montajes experimentales en los cuales la descarga se expresó por el coeficiente de una relación entre el flujo descargado por un vertedero de laberinto y el flujo descargado por un vertedero de cresta recta con el mismo ancho de longitud, es decir sin los ciclos del laberinto. Los coeficientes de descarga se generaron mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_l}{Q_n} = f(h, p, \text{cresta})$$

Megalhaes (1985) desarrolló sus montajes experimentales para estudios de aproximación. Para obtener sus resultados utilizaron los mismos términos gráficos que Darvas, expresando estas conclusiones numéricas en gráficas según coeficientes de descarga en función de la relación L/W . El coeficiente de descarga fue determinado por la ecuación:

$$C_p = \frac{Q_l}{W * 2g * H^{\frac{3}{2}}}$$

2.2. DISIPACIÓN DE ENERGÍA

2.2.1. DEFINICIÓN

La disipación de energía es, prevenir la erosión aguas abajo de los vertederos de rebose, rápidas, compuertas deslizantes y todo tipo de estructura hidráulica que genere elevada energía en el flujo. Al producirse la disipación de energía, se reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido, hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho aguas abajo.

El mecanismo de disipación es similar a la pérdida de energía que tiene un flujo a lo largo de su trayectoria, como fruto de las fuerzas de fricción y de corte pero con un alto porcentaje de disipación en cortas distancias, lo cual se produce debido a la turbulencia generada, ya sea por partículas de flujo dentro de una gran corriente de flujo o también por gotas de agua en una corriente de aire. En el primer caso la disipación, se relaciona con los remolinos formados en zonas de alta velocidad, por efecto de fuerzas cortantes y en el segundo, resulta como efecto de la resistencia del aire ejercida a las partículas de agua.

El resalto hidráulico es el caso más común de disipación de energía, generada por partículas de flujo dentro de otra corriente de flujo, razón e importancia de su estudio en el presente capítulo.

2.2.2. EFECTO DE LA GRAVEDAD

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * Dh}}$$

Donde, "V" es la velocidad de flujo, "g" es la aceleración de gravedad y "Dh" es la profundidad hidráulica, $Dh = A / T$, donde, "A"

es el área mojada y “T” es el ancho de la superficie (Ven te Chow, 2004).

2.2.3. CLASIFICACIÓN DEL FLUJO RESPECTO AL RÉGIMEN DE VELOCIDAD:

- **Flujo Supercrítico:** en este estado el papel jugado por las fuerzas inerciales es más pronunciado presenta una velocidad de flujo muy alta, una profundidad de flujo baja y se genera en condiciones de pendiente alta.
- **Flujo Crítico:** régimen de flujo intermedio, se caracteriza por generar alta inestabilidad en el flujo, no es recomendable para el diseño.
- **Flujo Subcrítico:** en este estado el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado por lo tanto se presenta una velocidad de flujo baja, tiene una profundidad de flujo alta y se genera en condiciones de baja pendiente.

Para $F = 1$ el flujo es crítico, cuando $F < 1$ el flujo es subcrítico, y si $F > 1$ el flujo es supercrítico.

2.2.4. ENERGÍA ESPECÍFICA

Es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de la velocidad en una sección de canal ($E = y + \frac{V^2}{2g}$). Cuando la profundidad de flujo se grafica en correlación con la energía específica para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una curva de energía específica; para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades: la profundidad baja y_1 y la profundidad alta y_2 . La profundidad alta es la profundidad alterna de la profundidad baja y viceversa. En el estado crítico la profundidad alterna se convierten en profundidad crítica y_c .

La energía específica en una sección de canal se define como la energía por unidad de masa de agua en cualquier sección de un canal medido con respecto al fondo de éste.

La energía específica se representa con la ecuación siguiente:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad \text{----- ecuación válida para pendiente grande.}$$

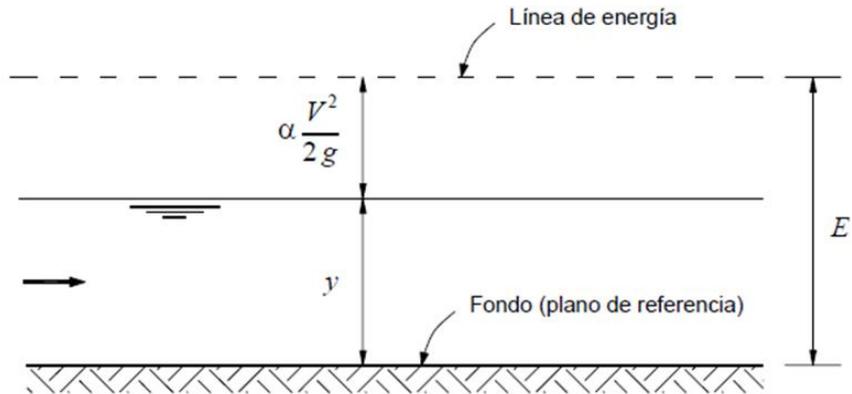
$$E = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \text{----- ecuación válida para una pendiente pequeña}$$

($\alpha=1$)

La ecuación anterior como primer equivalencia representa a la energía específica que es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad y la segunda equivalencia puede notarse que para una sección de canal y un caudal Q determinados, la energía específica en una sección de canal solo es función de la profundidad de flujo, esta última se puede graficar contra la energía específica y se obtiene la curva de energía específica. Para comprender de una mejor forma la ecuación de energía a continuación se presenta su interpretación, se aclara que es para un canal de pendiente baja.

La figura muestra la interpretación de la energía específica.

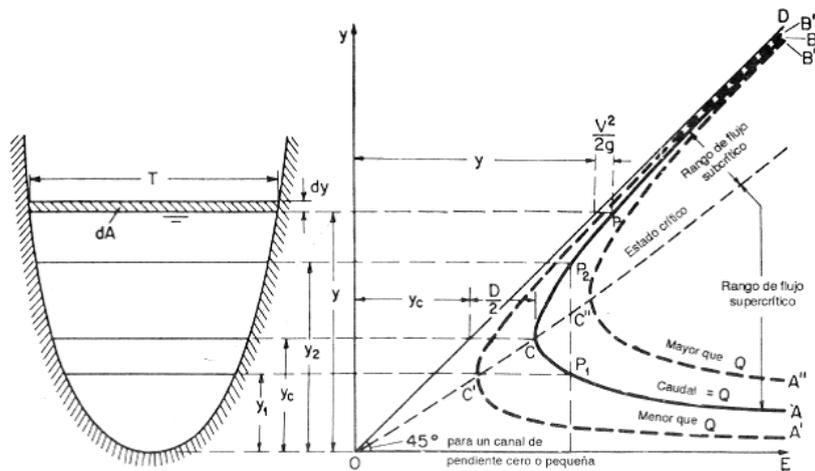
Figura 2.10: Interpretación de la energía específica



Fuente: Hidráulica de Tuberías y Canales, Arturo Rocha, pág. 324.

A continuación se muestra la figura que muestra un ejemplo de la curva de energía específica.

Figura 2.11: Ejemplo de curva de energía específica



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow, pág. 42.

2.2.5. CRITERIO PARA EL ESTADO CRÍTICO DE FLUJO

El estado crítico de flujo ha sido definido anteriormente como la condición para el cual el número de Froude es igual a la unidad o

definición más común es el estado de flujo para el cual la energía específica es mínima para un caudal determinado.

En el estado crítico de flujo la energía específica es mínima, o $dE/dy=0$. La anterior ecuación, por consiguiente da:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2}$$

Este es el criterio para el flujo crítico, el cual establece que en el estado crítico del flujo la altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica. La ecuación anterior se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{V}{\sqrt{g * D}} = 1$$

Para un canal con un ángulo de pendiente grande y un coeficiente de energía “ α ”, el criterio de flujo crítico queda:

$$\alpha * \left(\frac{V^2}{2g} \right) = \frac{(D * \cos \theta)}{2}$$

El número de Froude puede definirse como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * Dh}}$$

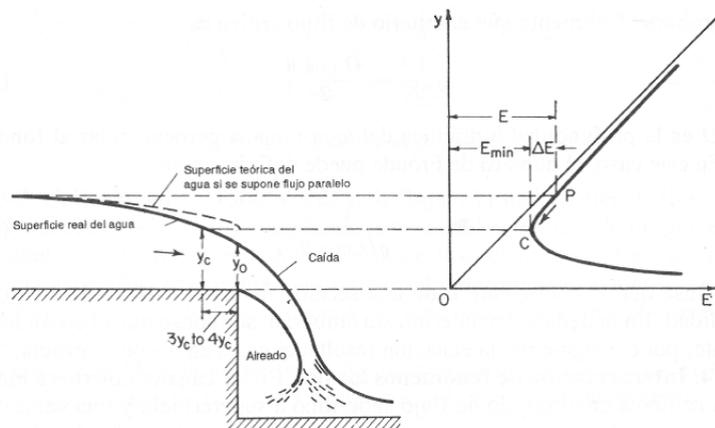
2.2.6. FENOMENOS LOCALES

Un fenómeno local es si el cambio ocurre con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta y el flujo es rápidamente variado. A continuación se describen dos fenómenos locales.

Caída Hidráulica: Un cambio rápido en la profundidad de flujo de un nivel alto a un nivel bajo resultara en una depresión abrupta de la superficie del agua, entonces caída hidráulica es un fenómeno causado por un cambio abrupto en la pendiente del canal o en la sección transversal.

Caída libre: es un caso especial de la caída hidráulica, esta ocurre cuando existen una discontinuidad en el fondo de un canal plano.

Figura 2.12: Caída libre interpretada mediante una curva de energía específica.



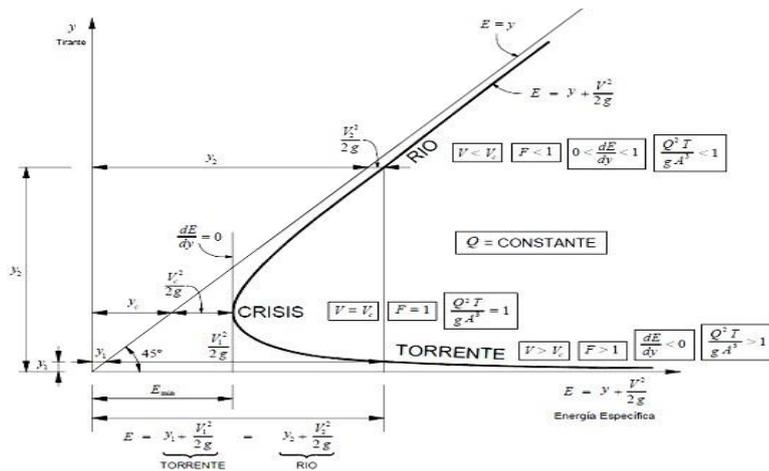
Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

2.2.7. ENERGIA ESPECÍFICA A GASTO CONSTANTE

La ecuación de energía específica a gasto constante puede ser graficada colocando en el eje de las abscisas o "X" los valores de la

energía específica y en el eje de las ordenadas o “Y” la profundidad del flujo o tirante.

Figura 2.13: Gráfico de la Energía Específica a gasto constante. (Curva E – y).



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

Donde.

y_1 e y_2 son las profundidades alternas ($E_1 = E_2$)

$$\frac{v_1^2}{2g} > \frac{v_2^2}{2g} \text{ ----- (flujo supercrítico) ----- } F > 1 \text{ (} y_1 > y_c \text{)}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} < \frac{v_2^2}{2g} \text{ ----- (flujo subcrítico) ----- } F < 1 \text{ (} y_2 > y_c \text{)}$$

Si $E < E_{min}$ no hay flujo posible del gasto Q

2.2.8. SALTO HIDRÁULICO

Llamado también, Resalto Hidráulico, es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico.

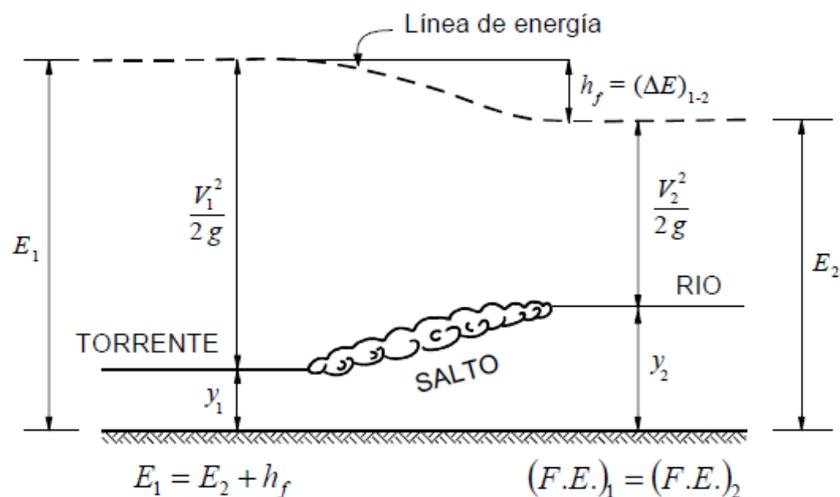
El resalto hidráulico es adecuado para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico.

Este involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo.

La profundidad antes del resalto se conoce como profundidad baja y_1 , y después del resalto se conoce como profundidad alta y_2 . Entonces, la energía específica E_1 correspondiente a la profundidad baja y_1 es mayor que la energía específica E_2 correspondiente a la profundidad alta y_2 en una cantidad igual a la pérdida de energía ΔE .

A continuación se muestra la siguiente imagen.

Figura 2.14: Salto Hidráulico.



Fuente: Hidráulica de Tuberías y Canales, Arturo Rocha.

2.2.8.1. SALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA

El resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico debido a que previene la posible erosión aguas debajo de vertederos de rebose, rápidas y compuertas deslizantes, pues reduce rápidamente la capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico son:

- Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.
- Recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas.
- Incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo.
- Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto.

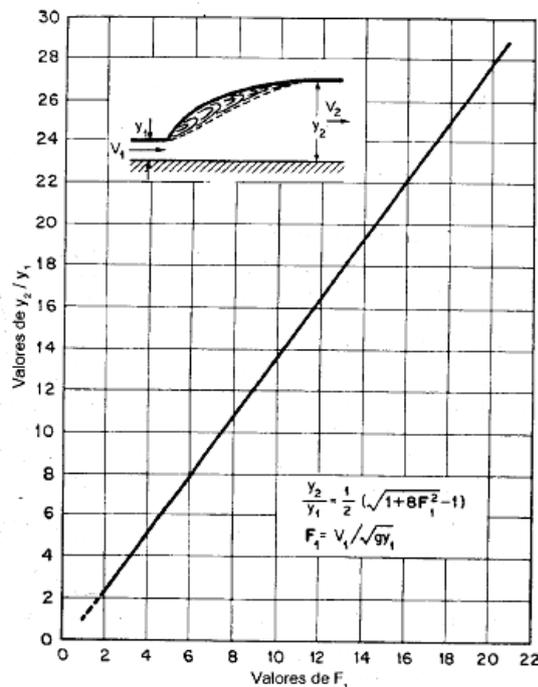
2.2.8.2. SALTO HIDRAULICO EN UN CANAL RECTANGULAR.

Para flujo supercrítico en un canal rectangular, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia de fricción a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo y aguas abajo satisfacen la siguiente ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

Esta ecuación puede representarse mediante la curva mostrada en la siguiente figura.

Figura 2.15: Relación entre F_1 y y_2 / y_1 para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal.



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

El salto hidráulico es un movimiento rápidamente variado, con fuerte curvatura de las líneas de corriente. Se caracteriza por la gran disipación de energía. Se puede describir como el paso violento de un régimen supercrítico a uno sub-crítico.

El salto hidráulico es un fenómeno tridimensional que se presenta grandes fluctuaciones de la velocidad y de la presión en cada punto; es decir, que tiene un alto radio de turbulencia, lo que se traduce en una alta capacidad de mezcla. En un salto hidráulico se produce también la incorporación de aire a la masa líquida, como también produce oleaje el cual se propaga aguas abajo.

2.2.8.3. TIPOS DE SALTO

$F = 1$, Flujo crítico, no hay salto.

$1 < F < 1.7$, "Salto ondular" (la superficie libre presenta ondulaciones y presenta el resalto ondulante).

Figura 2.16: Salto ondulante



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

$1.7 < F < 2.5$, "Salto débil" (la disipación de energía es pequeña, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme).

Figura 2.17: Salto débil



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

$2.5 < F < 4.5$, “Salto oscilante”, (se produce el efecto de chorro, hay ondas superficiales).

Figura 2.18: Salto oscilante



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

$4.5 < F < 9$, “Salto permanente o fijo”, (buena disipación de energía (45 – 70 %), la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical se llama también “resalto estable”).

Figura 2.19: Salto estante



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

$F \geq 9$, “Salto fuerte”, (gran disipación de energía 85%, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto).

Figura 2.20: Salto fuerte



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

2.2.8.4. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SALTO HIDRÁULICO

2.2.8.4.1. PERDIDAS DE ENERGÍA

En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto, como sigue:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4 * y_1 * y_2}$$

La relación $\Delta E/E_1$ se conoce como pérdida relativa.

2.2.8.4.2. EFICIENCIA

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia del resalto. Puede mostrarse que la eficiencia es:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{((8 * F^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4F^2 + 1)}{(8 * F^2 * (2 + F^2))}$$

La ecuación anterior indica que la eficiencia de un resalto es una función adimensional, que depende solo del número Froude del flujo de aproximación. La pérdida relativa es:

$$1 - \left(\frac{E_2}{E_1}\right) = \frac{\Delta E}{E_1}$$

Ésta también es una función adimensional de F1.

2.2.8.4.3. LONGITUD DEL RESALTO.

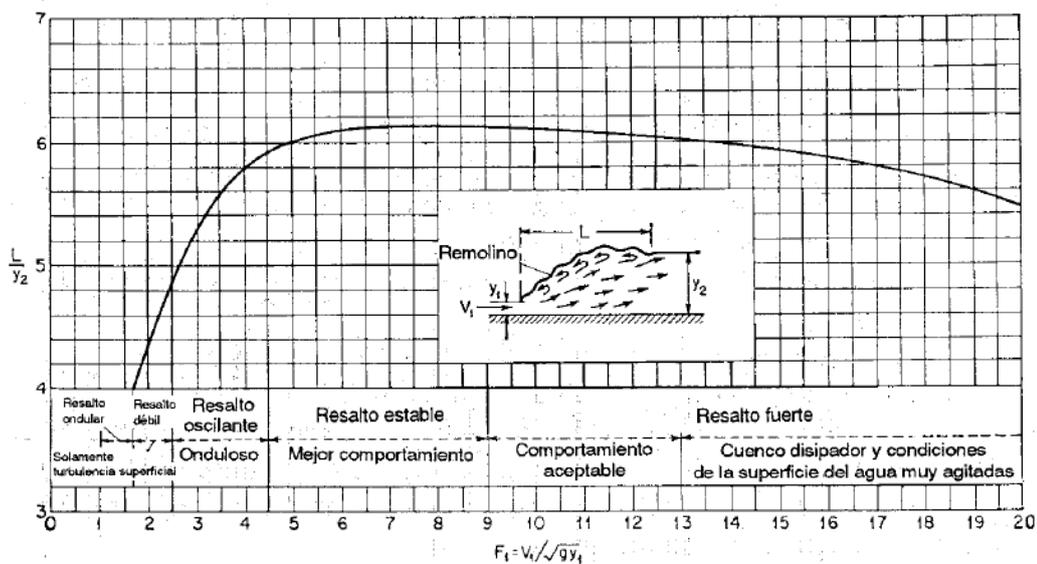
Esta puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. En teoría, esta longitud no puede determinarse con facilidad mediante el número de Froude F1 contra una relación adimensional $L / (y_2 - y_1)$, o L/y_1 o L/y_2 . Sin embargo a continuación se presenta la curva que muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos. Esto se puede observar en la figura siguiente.

Como se dijo anteriormente la longitud del salto es difícil de determinarse, pues esta depende de algunos factores como los siguientes: pendiente del canal, número de Froude, etc., pero aproximadamente se tiene:

$$L = 6.9 (y_2 - y_1)$$

En algunos casos para fijar el salto y disminuir su longitud se colocan dados o bloques.

Figura 2.21: Longitud en términos de la profundidad y_2 de resaltos en canales horizontales.



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

2.2.8.4.4. ALTURA DE RESALTO

La diferencia entre las profundidades antes y después del resalto es la altura de resalto, o $h_j = y_2 - y_1$. Al expresar cada término como la relación con respecto a la energía específica inicial.

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F^2} - 3}{F^2 + 2}$$

2.2.8.4.5. OLEAJE

En un salto hidráulico se producen ondas que se propagan hacia aguas abajo. Sus alturas y periodos

dependen del número de Froude incidente. Se designa como H_s a la altura significativa (promedio del tercio superior). Algunos autores han establecido relaciones válidas para el número de Froude, la siguiente relación se aplica para números de Froude mayores o iguales que siete:

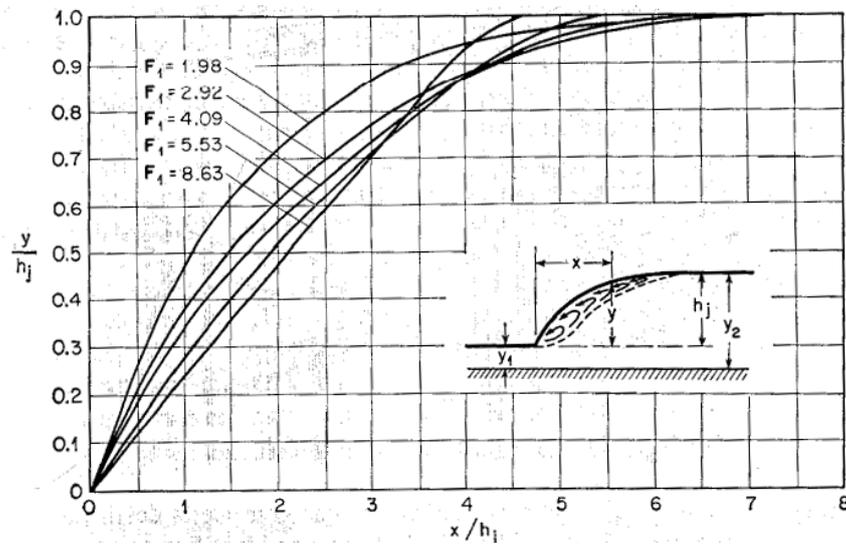
$$\frac{H_1}{y_1} = \frac{1}{6} (F_1 - 1)$$

2.2.8.4.6. PERFIL SUPERFICIAL DEL RESALTO

El conocimiento del perfil superficial de un resalto es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales donde ocurre el resalto, además es importante para determinar la presión que debe utilizarse en el diseño estructural del colchón amortiguador, debido a que experimentos han demostrado que la presión vertical en el piso horizontal bajo la acción de un resalto hidráulico, es prácticamente la misma que indicaría el perfil de la superficie del agua.

En base a los datos experimentales de Backhmeteff y Matzke, en la figura 1, se presenta una serie de curvas adimensionales para distintos valores de F_1 , con las que se puede determinar el perfil superficial de un resalto hidráulico.

Figura 2.22: Curvas Adimensionales para Determinar el Perfil del R.H



Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994.

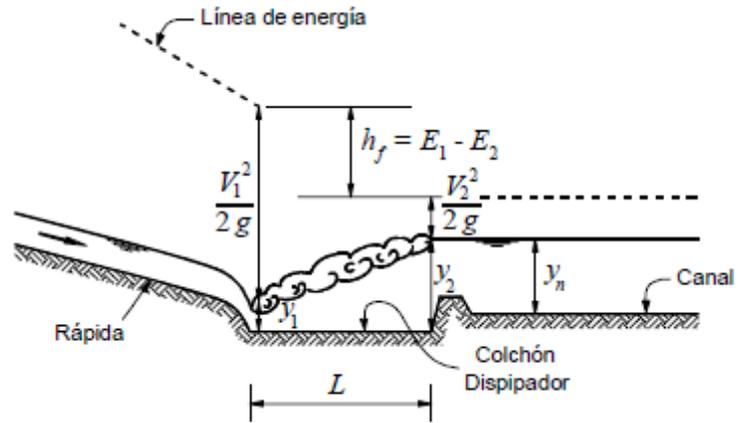
2.2.8.4.7. LOCALIZACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico puede ser localizado, determinando y comparando las energías específicas en el flujo supercrítico y en el flujo subcrítico y de esta forma, conocer si el resalto es sumergido o rechazado. Una vez conocido el tipo de resalto y el calado uniforme aguas abajo, valiéndonos de la curva de energía específica Vs altura de agua, se determina el tipo de curva de remanso y con esto el inicio del resalto hidráulico.

2.2.8.5. EJEMPLOS DE RESALTO HIDRÁULICO

Para vencer un desnivel se construye una rampla. Al final de ella debe disiparse la energía. El salto hidráulico actúa como disipador de energía.

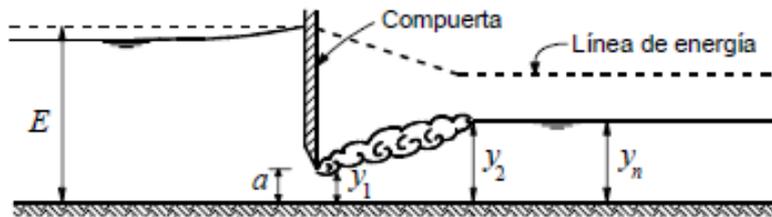
Figura 2.23: Ejemplo de resalto hidráulico caída rápida



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

Si en un canal se coloca una compuerta que deja una abertura en la parte inferior se produce aguas abajo un salto hidráulico.

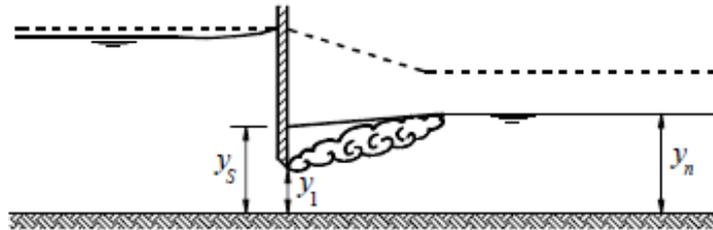
Figura 2.24: Salto Hidráulico Libre



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

Si en un canal se coloca una compuerta que deja una abertura en la parte inferior se produce aguas abajo un salto hidráulico.

Figura 2.25: Salto Hidráulico Ahogado



Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos, Ven Te Chow.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1. MATERIAL Y METODOS

3.1.1. MATERIAL

Para el trabajo de investigación se han utilizado 04 prototipos de vertederos tipo laberinto (triangular, trapezoidal, rectangular y circular) realizados de material de acero y acondicionados a medida para el Canal de Pendiente Variable ubicado en el laboratorio de hidráulicas - UPAO, y 01 vertedero rectangular (sin contracciones laterales) perteneciente al laboratorio de hidráulica de la UPAO.

3.1.2. MÉTODOS

El proyecto de investigación se realizó teniendo en cuenta los parámetros de la investigación experimental. “La investigación experimental consiste en la elaboración de ensayos y la manipulación de los prototipos de vertederos antes mencionados, en condiciones rigurosamente supervisadas, con el fin de describir e investigar la influencia de la geometría hidrodinámica de cada vertedero en la disipación de energía de un flujo constante con igual caudal de descarga y pendiente. Se trata de un experimento porque precisamente el investigador provoca una situación para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esa variable, y su efecto en las conductas observadas. El investigador maneja deliberadamente la variable experimental y luego observa lo que sucede en situaciones controladas.

La metodología para establecer la disipación de energía en el flujo, está dada básicamente por el tipo de Resalto Hidráulico generado por cada uno de los prototipos, con variación en el caudal y la pendiente longitudinal dentro del canal de pendiente variable.

3.1.3. EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL

3.1.3.1. CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

El equipamiento experimental utilizado en el Laboratorio de la Universidad Privada Antenor Orrego consiste en un canal de Pendiente Variable el cual ha sido adquirida de La Empresa Didacta Italia el año 2,015, siendo el modelo H91.8D/15 m, este canal de pendiente variable tiene una longitud de 15 m, un ancho de canal de 0.30 m y una altura de canal 0.50 m, las pendientes se pueden ajustar hasta +3 grados y -0,5 grados.

Las paredes laterales del canal son de vidrio para mayor visibilidad pero su fondo es de plancha de acero inoxidable.

El canal está compuesto por cinco partes, las cuales se describen a continuación:

a. Tanque de Almacenamiento y Bomba de Impulsión.

Este tanque está construido en acero inoxidable, con dimensiones de 3.0 m. x 1.5 m. x 1.0 m.; cuya capacidad es de 4.5 m³, (fotografía 01).

El tanque almacena el agua el cual va a ser bombeado al canal y luego de pasar por este, es nuevamente recogido formándose un ciclo cerrado de flujo.

En proximidad al tanque está colocada una electrobomba centrífuga con válvula mariposa la cual permite el control del flujo, así mismo existe un manómetro que mide presiones negativas que puedan producir cavitación en la bomba.

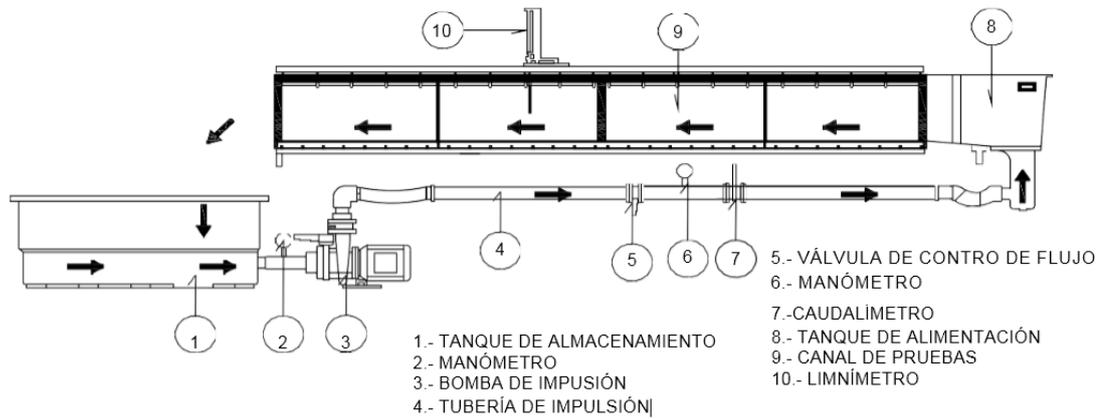
Las características de la Bomba son:

Marca: Calpeda, fabricado en Italia

Potencia: 4.0 HP

Q max./min. = 150/48 m³/hora. (41.67 / 13.33 l/s)
H max./min. = 9.4 / 4.0 m.

Figura 3.1: Esquema de canal pendiente variable



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 01.- Tanque de Almacenamiento y bomba de impulsión. (UPAO)



Fuente: Elaboración propia

b. Tubería de Impulsión y Caudalímetro

La tubería de impulsión es de acero inoxidable de 100 mm de diámetro el cual conduce el agua del tanque de alimentación del canal.

En esta tubería de impulsión se encuentra instalado el rotámetro (fotografía 02), el cual en su interior consta de un diafragma con un orificio, y la lectura del canal se realiza en un tubo transparente indicado por el nivel de agua.

Fotografía 02.- Rotámetro y válvula de regulación de caudal. (UPAO)



Fuente: Elaboración propia

c. Tanque de Alimentación del Canal

Está ubicado antes del canal de prueba y conectado directamente con éste; cuenta con una compuerta y una malla de acero inoxidable a la salida de este, lo cual permite alimentar el canal sin turbulencias que perturbarían las pruebas.

d. Canal de Prueba

La sección de prueba y tanque de descarga tiene la posibilidad de ser inclinada de hasta +3 grados y -0,5 grados, con un mecanismo de manivelas accionado por un motor que permite variar en continuo dicha inclinación.

Donde termina la sección de prueba ha sido prevista una compuerta accionable manualmente, que permite variar el nivel del agua en el interior del canal.

f. Control de Mandos

Está colocado en posición fuera del canal y está instalado sobre un bastidor de soporte (fotografía 03 y 04).

En el cuadro están alojados los mandos de inicio y parada de la bomba centrífuga y del motor de control de pendiente y el interruptor general.

Fotografía 03.- Canal de Prueba y control de mandos (UPAO)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 04.- Canal de Prueba y control de mandos (UPAO)



Fuente: Elaboración propia

3.1.4. DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES

3.1.4.1. CRITERIOS DE DISEÑO

3.1.4.1.1. ECUACIONES DE DISEÑO

Falvey (2003) hace una selección de ecuaciones de diseño desarrolladas por otros autores a través de las observaciones realizadas a sus respectivos trabajos de investigación. Estas ecuaciones son desarrolladas para determinar número y ancho de ciclos, longitud de cresta del vertedero, ángulo de apertura entre las paredes del ciclo, longitud de la pared larga del vertedero y la altura de la pared del vertedero tipo laberinto.

Algunos autores han incluido otros dimensionamientos particulares a los cálculos del vertedero, expresados en ecuaciones para el cálculo para el espesor de pared del vertedero, el acabo de pared o recubrimiento, concreto, longitud efectiva y acero de refuerzo. Estas características son muy variables, porque están a la orden del criterio del proyectista, y la evaluación que se haga para la construcción de la obra.

3.1.4.1.1.1 NÚMERO DE CICLOS

Lux y Hinchliff (1985), desarrollaron una ecuación para determinar el número de ciclos a utilizar en el vertedero en base al caudal a descargar.

$$\frac{Q_l}{Q_c} = n$$

Donde Q_l es el caudal descargado por el vertedero tipo laberinto y Q_c es el caudal descargado por un vertedero de cresta recta.

El número de ciclos a considerar en los modelos también debe atender a la disponibilidad de espacio en el canal donde se experimentará.

3.1.4.1.1.2. ANCHO DE CICLO

El ancho de cada ciclo (W) se obtiene de la división entre el ancho del canal de vertedero (W_c) y el número de ciclos (n).

$$W = \frac{W_c}{n}$$

3.1.4.1.1.3. LONGITUD DE LA CRESTA

En un vertedero tipo laberinto trapezoidal, la longitud de la cresta está dada por la siguiente ecuación:

$$L = 2B + 4a$$

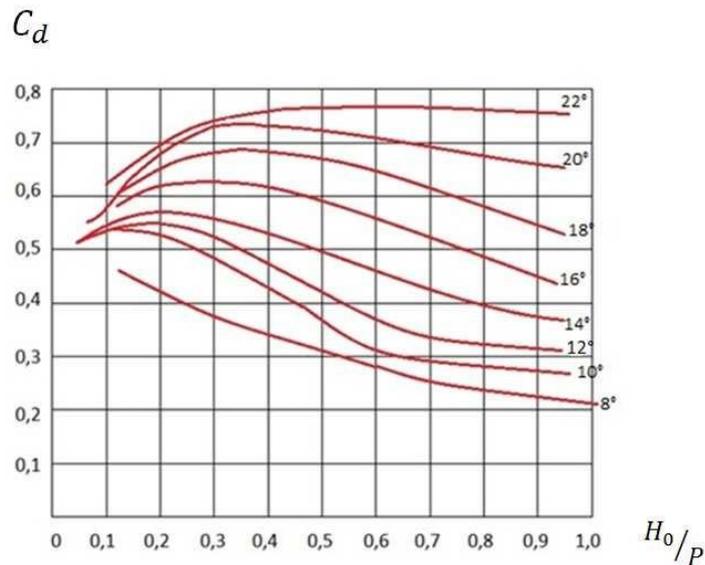
Donde “B” es la longitud de la pared del vertedero y “a” es el valor que corresponde a la mitad del ápice.

3.1.4.1.1.4. ÁNGULO ENTRE PAREDES DEL VERTEDERO

Tullis (1994) desarrolló una serie de montajes para determinar el ángulo que se produce entre las paredes del vertedero tipo laberinto, donde arrojó como resultado una gráfica para los diferentes valores sometidos a experimentación. La gráfica expresa valores para ángulos entre 6° y 90° que equivale a un vertedero de cresta viva.

Taylor (1970) por su parte también estudió el ángulo “ α ” entre las paredes del vertedero. Destaca un óptimo funcionamiento en un rango comprendido entre 9.5° a 7° para éste ángulo. Sin embargo, Delgado (2012) explica que existe una deficiencia en las conclusiones de las investigaciones de Taylor, se recurre a las gráficas de Tullis para estimar mejores valores de diseño que se puedan implementar para este parámetro.

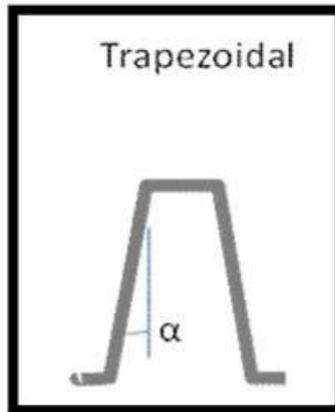
Gráfica 3.1: Coeficientes de descarga para el valor del ángulo alfa.



Fuente: Tullis (1995)

En esta gráfica Tullis (1995), representa los coeficientes de descarga para ángulos en un rango de 8° a 22° , en función a la relación H_0/P .

Figura 3.1: Vista en planta del ángulo de las paredes del vertedero en laberinto trapezoidal, con respecto al eje del vertedero.



Fuente: Delgado (2009).

3.1.4.1.1.5. ÁPICES

Se define por ápice al extremo superior o punta de algo. En el caso particular del modelo a ensayar los ápices corresponden a sus caras frontales perpendiculares al flujo. Para el cálculo del ápice la ecuación más completa está deducida por Falvey (2003) quien indica que el valor más bajo al cual ocurre la interferencia (donde el vertedero comienza a trabajar como estructura de control).

$$a = \sin \frac{W - 4 \alpha}{L - 4 \alpha}$$

Donde “a” corresponde al valor de la mitad del ápice, “W” es el ancho del ciclo y “L” la longitud de cresta.

Tullis (1995) indica que el cálculo de la longitud del ápice viene dado por un coeficiente expresado entre la longitud de su ciclo (Le) y su propia longitud (a).

$$\frac{a}{Le} > 0.08$$

3.1.4.1.1.6. LONGITUD DE LA PARED DE VERTEDERO

La longitud de la pared de vertedero (B) resulta de la ecuación desarrollada por Falvey (2003).

$$B = \frac{L - 2(2a)}{2}$$

Donde “a” corresponde al valor de la mitad del ápice y “L” es la longitud de la cresta.

3.1.4.1.1.7. ALTURA DE LAS PAREDES DEL VERTEDERO

Para calcular el valor de “P”, se toma el cálculo de recomendaciones de Falver (2002) y Tullis (2001), donde establece como criterio constructivo un valor mínimo de altura de pared de vertedero de 8 a 10 cm.

3.1.4.1.1.8. CONDICIONES DE APROXIMACIONES LATERALES Y POSICIÓN DEL VERTEDERO

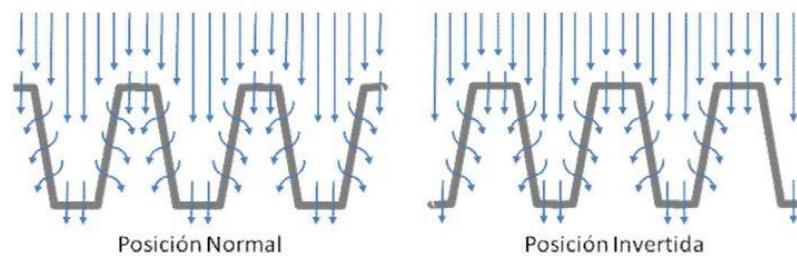
Tullis (1996) destaca que es necesario en modelos experimentales desarrollar una aproximación lateral simétrica. Se basó además en estudios de Cassidy (1983) para el diseño de la estructura del canal de aproximación. Este autor realizó importantes estudios con respecto a las variantes de la aproximación del flujo, rompiendo los esquemas al ubicar la estructura del vertedero completamente dentro del reservorio. Fue su iniciativa introducir la extensión de todos los ciclos del laberinto dentro del reservorio para realizar observaciones en

la descarga, pero Houston no expresó resultados gráficos al respecto.

Delgado (2009), por medio de un modelo experimental genérico a escala, desarrollo algunas propiedades geométricas de esta clase de vertederos concluyendo que si el vertedero esta introducido en el reservorio de agua, influye en la descarga. Esto siempre y cuando haya una aproximación circular en los costados del mismo.

Falvey (2003) considera que utilizando una posición normal del vertedero hacia la pared del canal de alivio, la descargar es un 9% mayor que la observada en una posición invertida.

Figura 3.2: Posición normal e invertida del vertedero



Fuente: Elaboración Propia

3.1.5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

3.1.5.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS PROTOTIPOS

Las características geométricas fueron calculadas teniendo en cuenta los criterios descritos en el ítem 3.1.4.1. de la presente tesis. Los cálculos fueron desarrollados en función del ancho del canal de pendiente variable de la UPAO (W_c).

Tabla 3.1: Datos calculados según la metodología.

	n	P (m.)	α	a (m.)	W_c (m.)	W (m.)	L (m.)	B (m.)
Vertedero L. Triangular	2	0.20	22°	-	0.30	0.15	0.38	0.19
Vertedero L. Trapezoidal	2	0.20	12°	0.04	0.30	0.15	0.48	0.16
Vertedero L. Rectangular	2	0.20	-	0.08	0.30	0.15	0.62	0.15
Vertedero L. Circular	2	0.20	-	0.12	0.30	0.15	0.70	0.11

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5.2. CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Los prototipos se elaboraron con los siguientes materiales y acabados para garantizar su uso y duración en el transcurso de los ensayos de laboratorio:

- Plancha negra de acero $e=5\text{mm}$.
- Soldadura eléctrica para la fierro (punto azul E-6011).
- Broca 3/8".
- Disco de corte (NORTON 4).
- Masilla Extrafuerte para acero, Bonflex.

- Tratamiento en Arenado antes de ser pintado.
- Esmerilado y Lijado con equipo mediano de banco.
- Pintura Epóxica y Pintura de Barco (color acero).

Los prototipos de vertedero tipo laberinto están conformados por una base horizontal de acero con un espesor= 5mm y un cuerpo de vertedero teniendo en cuenta las geometrías hidrodinámicas antes mencionadas, siendo éstas acondicionadas a medida para el canal de pendiente variable.

Se realizaron los planos en planta 2D y planos en 3D de cada prototipo en el software AutoCAD para poder tener mayor detalle de sus vistas, cortes, elevaciones y dimensiones para su futura construcción.

Fotografía N° 05: Vertedero Laberinto Circular



Fuente: Elaboración propia

Fotografía N° 06: Vertederos Laberinto Triangular, rectangular y Trapezoidal



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. ALCANCES Y PROCEDIMIENTO

4.1.1. ALCANCES

La presente investigación de laboratorio se llevó a cabo en el canal de pendiente variable ubicado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego.

Las condiciones de los ensayos fueron a velocidad y pendiente variadas, y con un solo caudal de flujo por cada ensayo.

Se tuvo que realizar una calibración del rotámetro del canal de pendiente variable mediante ensayos volumétricos de aforo.

4.1.2. PROCEDIMIENTOS

4.1.2.1. EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

Se ubicaron cada uno de los vertederos a una distancia de 5.00 m. del tanque de distribución para poder observar el comportamiento del fluido aguas arriba, sobre la cresta del vertedero y aguas abajo. Antes de iniciar los ensayos con los vertederos tipo laberinto, se usó el vertedero tipo rectangular sin contracciones laterales para calibrar los caudales mediante ensayos de aforo volumétricos a caudales de 20 m³/h, 25 m³/h, 30 m³/h, 35 m³/h, 40 m³/h, 45 m³/h y 50 m³/h, indicados por el rotámetro.

Cada uno de los vertederos tipo laberinto fueron ensayados a pendientes de 0%, 1% y 2% con cuatro caudales seleccionados distintos en cada ensayo.

Se procedió a la toma de datos en cada ensayo. Los datos tomados fueron tirantes y velocidades del fluido en 10 puntos cada 10.00 cm. del vertedero aguas arriba y aguas abajo, y las velocidades y cargas hidráulicas sobre el vertedero.

Las velocidades fueron captadas mediante un equipo digital adjunto al canal de pendiente variable.

4.2. OBSERVACIÓN DE LOS ENSAYOS CON LOS VERTEDEROS

4.2.1. OBJETIVO Nº 01: CALIBRACIÓN DE ROTÁMETRO

La calibración del rotámetro se realizó mediante ensayos volumétricos usándose un vertedero tipo rectangular y obteniéndose los siguientes datos:

Tabla Nº 4.1: Calibración de caudal para Q= nivel bajo según rotámetro

PRUEBA 01 (CAUDAL BAJO)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
8.750	8.741	0.960	9.105	0.665	0.442	
10.250	10.271	1.160	8.855	0.414	0.172	
10.550	10.577	1.310	8.074	-0.366	0.134	
12.250	12.312	1.450	8.491	0.051	0.003	
11.750	11.802	1.320	8.941	0.501	0.251	
11.250	11.292	1.400	8.065	-0.375	0.140	
10.050	10.067	1.180	8.532	0.091	0.008	
9.250	9.251	1.120	8.260	-0.180	0.033	
10.050	10.067	1.270	7.927	-0.513	0.263	
10.250	10.271	1.260	8.152	-0.288	0.083	
Promedio			8.440		1.529	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	0.170	Para n= 10
				σ	0.412	
				E	0.261	
				error	3.088	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.2: Calibración de caudal para Q= 20 m³/h según rotámetro

PRUEBA 02 (CAUDAL 20)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
8.950	8.945	0.970	9.222	0.118	0.014	
8.750	8.741	1.030	8.486	-0.617	0.381	
8.750	8.741	1.000	8.741	-0.363	0.132	
13.450	13.536	1.440	9.400	0.297	0.088	
10.750	10.781	1.200	8.985	-0.119	0.014	
10.850	10.883	1.180	9.223	0.120	0.014	
12.550	12.618	1.510	8.356	-0.747	0.559	
12.750	12.822	1.380	9.291	0.188	0.035	
12.250	12.312	1.280	9.619	0.515	0.265	
12.750	12.822	1.320	9.714	0.610	0.372	
Promedio			9.104		1.874	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	0.208	Para n= 10
				σ	0.456	
				E	0.289	
				error	3.170	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.3: Calibración de caudal para Q= 25 m³/h según rotámetro

PRUEBA 03 (CAUDAL 25)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
12.250	12.312	1.210	10.175	-0.673	0.453	
13.750	13.842	1.310	10.567	-0.282	0.079	
13.750	13.842	1.240	11.163	0.315	0.099	
13.250	13.332	1.090	12.231	1.383	1.913	
12.250	12.312	1.170	10.523	-0.325	0.106	
12.550	12.618	1.170	10.785	-0.064	0.004	
11.550	11.598	1.030	11.260	0.411	0.169	
13.050	13.128	1.220	10.761	-0.088	0.008	
12.750	12.822	1.220	10.510	-0.339	0.115	
12.750	12.822	1.220	10.510	-0.339	0.115	
Promedio			10.848		3.061	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	0.340	Para n= 10
				σ	0.583	
				E	0.369	
				error	3.400	

Fuente: Elaboración propia

Tabla Nº 4.4: Calibración de caudal para Q= 30 m3/h según rotámetro

PRUEBA 04 (CAUDAL 30)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
13.250	13.332	1.120	11.904	-1.297	1.682	
13.950	14.046	0.920	15.268	2.067	4.273	
13.750	13.842	1.040	13.310	0.109	0.012	
14.750	14.863	1.110	13.390	0.189	0.036	
13.250	13.332	1.030	12.944	-0.257	0.066	
14.250	14.352	1.100	13.048	-0.153	0.023	
14.750	14.863	1.140	13.037	-0.163	0.027	
14.750	14.863	1.130	13.153	-0.048	0.002	
12.750	12.822	1.030	12.449	-0.752	0.566	
13.950	14.046	1.040	13.506	0.305	0.093	
Promedio			13.201		6.780	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	0.753	Para n= 10
				σ	0.868	
				E	0.549	
				error	4.158	

Fuente: Elaboración propia

Tabla Nº 4.5: Calibración de caudal para Q= 35 m3/h según rotámetro

PRUEBA 05 (CAUDAL 35)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
13.750	13.842	0.980	14.125	-1.056	1.116	
14.950	15.067	1.120	13.452	-1.729	2.988	
13.950	14.046	0.880	15.962	0.781	0.610	
13.950	14.046	0.950	14.786	-0.395	0.156	
14.750	14.863	0.940	15.811	0.630	0.397	
14.750	14.863	0.950	15.645	0.464	0.215	
16.250	16.393	1.100	14.903	-0.278	0.077	
16.450	16.597	1.030	16.114	0.933	0.870	
16.250	16.393	1.060	15.465	0.284	0.081	
17.250	17.413	1.120	15.548	0.367	0.134	
Promedio			15.181		6.645	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	0.738	Para n= 10
				σ	0.859	
				E	0.543	
				error	3.580	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.6: Calibración de caudal para Q= 40 m3/h según rotámetro

PRUEBA 06 (CAUDAL 40)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
17.950	18.128	1.020	17.772	-1.369	1.874	
18.750	18.944	1.030	18.392	-0.749	0.561	
19.250	19.454	1.020	19.073	-0.069	0.005	
16.550	16.699	0.940	17.765	-1.376	1.893	
16.050	16.189	0.830	19.505	0.364	0.132	
14.250	14.352	0.720	19.934	0.793	0.629	
14.250	14.352	0.750	19.137	-0.004	0.000	
15.750	15.883	0.850	18.686	-0.455	0.207	
14.150	14.250	0.660	21.592	2.451	6.005	
14.750	14.863	0.760	19.556	0.415	0.172	
Promedio			19.141		11.479	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	1.275	Para n= 10
				σ	1.129	
				E	0.714	
				error	3.732	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.7: Calibración de caudal para Q= 45 m3/h según rotámetro

PRUEBA 07 (CAUDAL 45)				Estimacion de incertidumbre		
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ ²	
12.750	12.822	0.620	20.681	-1.282	1.644	
12.750	12.822	0.600	21.370	-0.593	0.352	
13.750	13.842	0.640	21.629	-0.334	0.112	
14.150	14.250	0.610	23.361	1.398	1.956	
13.950	14.046	0.630	22.296	0.333	0.111	
15.250	15.373	0.660	23.292	1.329	1.767	
13.750	13.842	0.650	21.296	-0.667	0.445	
14.250	14.352	0.700	20.504	-1.459	2.130	
14.750	14.863	0.670	22.183	0.220	0.048	
15.750	15.883	0.690	23.019	1.056	1.115	
Promedio			21.963		9.679	
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	1.075	Para n= 10
				σ	1.037	
				E	0.656	
				error	2.986	

Fuente: Elaboración propia

Tabla Nº 4.8: Calibración de caudal para Q= 50 m3/h según rotámetro

PRUEBA 08 (CAUDAL 50)				Estimacion de incertidumbre	
h (cm.)	Vol (L.)	t(seg.)	Q (L/seg.)	Q-Qo	dQ^2
14.250	14.352	0.510	28.142	-0.439	0.193
13.250	13.332	0.490	27.209	-1.373	1.884
15.750	15.883	0.570	27.865	-0.716	0.513
17.450	17.617	0.670	26.295	-2.286	5.228
16.750	16.903	0.510	33.144	4.562	20.816
17.050	17.209	0.580	29.671	1.090	1.188
18.250	18.434	0.670	27.513	-1.068	1.141
19.250	19.454	0.710	27.400	-1.181	1.395
19.250	19.454	0.690	28.194	-0.387	0.150
17.750	17.924	0.590	30.379	1.798	3.232
Promedio			28.581		35.740
				$((x-x_0)^2)/(n-1)$	3.971
				σ	1.993
				E	1.260
				error	4.410 %

Para n= 10

Fuente: Elaboración propia

Después de desarrollar los cálculos, se obtuvo la siguiente calibración resumen:

Tabla Nº 4.9: Resultados de la calibración de rotámetro

Medidos por rotámetro		
Q (m3/h)	Q(L/seg)	Q REAL (L/seg.)
BAJO	-	8.440
20	5.556	9.104
25	6.944	10.848
30	8.333	13.201
35	9.722	15.181
40	11.111	19.141
45	12.500	21.963
50	13.889	28.581

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. OBJETIVO N° 02: MEDICIONES PARA DETERMINAR COEFICIENTES DE DESCARGA.

Se seleccionaron estos cuatro caudales para el desarrollo de la investigación:

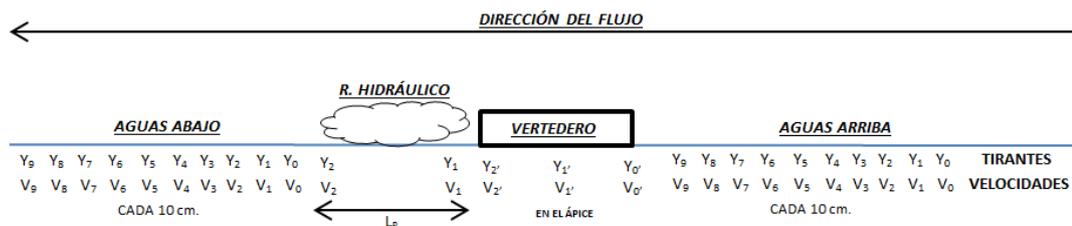
Tabla N° 4.10: Caudales seleccionados para la investigación.

Medidos por rotámetro		
Q (m3/h)	Q(L/seg)	Q REAL (L/seg.)
20	5.556	9.104
30	8.333	13.201
40	11.111	19.141
50	13.889	28.581

Fuente: Elaboración propia

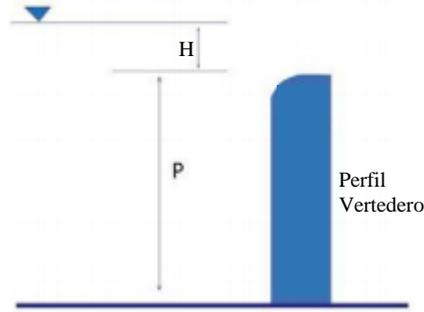
Para el objetivo N°02 y N° 03 se utilizaron los siguientes gráficos para determinar las características del flujo.

Figura 4.1: Esquema para toma de datos experimentales.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Esquema para toma de datos experimentales.



Fuente: Elaboración propia

4.2.2.1. PARA VERTEDERTO TIPO LABERINTO TRIANGULAR

- DATOS CONSTANTES:

- P (m.) = 0.20

H (m.)	Triangular	Q (L/s)	Para 0%, 1% y 2%
		9.104	0.0440
13.201		0.0590	
19.141		0.0730	
28.581		0.0860	

Tabla 4.11: Tirantes tomados aguas arriba

		TIRANTES TOMADOS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (cm.)											
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
VERTEDERO LABERINTO TIPO TRIANGULAR	0%	9.104	24.2	24.2	24.2	24.2	24.3	24.4	24.4	24.6	24.5	24.5	
		13.201	25.8	25.7	25.6	25.8	25.9	26	26.1	26.2	26.1	26	
		19.141	27.4	27.4	27.3	27.4	27.5	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6	27.5
		28.581	28.4	28.4	28.4	28.5	28.5	28.7	28.7	28.8	28.8	28.8	28.7
	1%	9.104	23.2	23.3	23.4	23.6	23.7	23.8	24	24.2	24.3	24.4	
		13.201	24.8	24.8	24.9	25.1	25.3	25.4	25.6	25.8	25.9	25.9	
		19.141	26.4	26.4	26.5	26.6	26.7	26.9	27.1	27.3	27.3	27.3	
		28.581	27.5	27.7	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5	28.6	28.6	28.5	
	2%	9.104	22.1	22.2	22.4	22.7	23	23.2	23.5	23.8	24	24.1	
		13.201	23.8	23.9	24.1	24.4	24.7	24.9	25.2	25.5	25.6	25.8	
		19.141	25.2	25.3	25.6	25.8	26	26.2	26.5	26.9	27.1	27.2	
		28.581	26.5	26.8	26.8	27.1	27.4	27.6	27.9	28.1	28.5	28.5	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.12: Velocidades tomadas aguas arriba

		VELOCIDADES TOMADAS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (m/s)										
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0%	9.104	0.1611	0.1576	0.1614	0.1626	0.1650	0.1650	0.1650	0.1779	0.1785	0.1826	0.1894
	13.201	0.2150	0.2162	0.2170	0.2170	0.2200	0.2229	0.2306	0.2306	0.2279	0.2259	0.2494
	19.141	0.2603	0.2588	0.2553	0.2553	0.2544	0.2665	0.2641	0.2641	0.2700	0.2768	0.3053
1%	28.581	0.3038	0.3024	0.3053	0.3009	0.2979	0.3024	0.3038	0.3038	0.3053	0.3091	0.3544
	9.104	0.1953	0.1947	0.1935	0.1935	0.1906	0.1900	0.1897	0.1897	0.1897	0.1894	0.1809
	13.201	0.2309	0.2320	0.2347	0.2326	0.2288	0.2347	0.2406	0.2406	0.2347	0.2347	0.2582
2%	19.141	0.2788	0.2759	0.2750	0.2753	0.2774	0.2765	0.2759	0.2759	0.2797	0.2838	0.3103
	28.581	0.3156	0.3165	0.3171	0.3200	0.3230	0.3082	0.3091	0.3091	0.3347	0.3385	0.3944
	9.104	0.2053	0.2029	0.2012	0.2020	0.2023	0.2003	0.1979	0.1979	0.2014	0.2041	0.2129
VERTEDERO LABERINTO TIPO TRIANGULAR	13.201	0.2465	0.2494	0.2406	0.2406	0.2435	0.2406	0.2523	0.2523	0.2494	0.2553	0.2788
	19.141	0.3244	0.3141	0.2847	0.2891	0.2935	0.2935	0.2906	0.2906	0.2906	0.2906	0.2994
	28.581	0.3465	0.3435	0.3406	0.3374	0.3347	0.3377	0.3377	0.3377	0.3383	0.3385	0.3759

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO TRAPEZOIDAL

- DATOS CONSTANTES:

- P (m.) = 0.20

H (m.)	Trapezoidal	Q (L/s)	Para 0%, 1% y 2%
		9.104	0.0375
13.201	0.0510		
19.141	0.0650		
28.581	0.0770		

Tabla 4.13: Tirantes tomados aguas arriba

		TIRANTES TOMADOS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (cm.)											
		Pendientes	Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VERTEDERO LABERINTO TIPO TRAPEZOIDAL	0%	9.104	23.7	23.7	23.7	23.8	23.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
		13.201	24.9	24.9	24.9	25.0	25.1	25.2	25.3	25.4	25.4	25.3	
		19.141	26.5	26.5	26.5	26.6	26.6	26.7	26.8	26.9	26.8	26.7	
		28.581	27.4	27.5	27.6	27.7	27.8	27.9	28.0	28.1	27.9	27.8	
	1%	9.104	22.5	22.6	22.7	22.9	23.1	23.2	23.4	23.6	23.7	23.8	
		13.201	23.9	24.0	24.1	24.3	24.5	24.6	24.8	25.0	25.1	25.1	
		19.141	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1	26.3	26.5	26.5	26.5	
		28.581	26.5	26.6	26.6	26.8	27.0	27.2	27.5	27.7	27.6	27.5	
	2%	9.104	21.5	21.5	21.8	22.1	22.3	22.6	22.9	23.2	23.4	23.6	
		13.201	22.8	23.0	23.3	23.6	23.8	24.0	24.4	24.6	24.8	25.0	
		19.141	24.3	24.5	24.7	25.0	25.2	25.5	25.8	26.1	26.2	26.3	
		28.581	25.4	25.6	25.8	26.0	26.4	26.6	26.7	27.1	27.4	27.4	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.14: Velocidades tomadas aguas arriba

		VELOCIDADES TOMADAS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (m/s)										
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0%	9.104	0.1779	0.1732	0.1670	0.1697	0.1714	0.1697	0.1670	0.1670	0.7966	0.1744	0.1964
	13.201	0.2288	0.2259	0.2273	0.2294	0.2318	0.2320	0.2323	0.2335	0.2335	0.2338	0.2406
	19.141	0.2612	0.2582	0.2553	0.2553	0.2582	0.2641	0.2671	0.2788	0.2788	0.2818	0.3024
	28.581	0.3068	0.3056	0.3053	0.3056	0.3038	0.3029	0.3024	0.3024	0.3024	0.3112	0.3730
1%	9.104	0.1738	0.1726	0.1709	0.1703	0.1700	0.1738	0.1761	0.1761	0.1759	0.1759	0.1811
	13.201	0.2450	0.2412	0.2406	0.2438	0.2459	0.2406	0.2400	0.2400	0.2385	0.2373	0.2582
	19.141	0.2847	0.2847	0.2876	0.2876	0.2906	0.2906	0.2906	0.2906	0.2935	0.2935	0.3141
	28.581	0.3141	0.3141	0.3141	0.3171	0.3200	0.3200	0.3200	0.3200	0.3318	0.3377	0.3524
2%	9.104	0.2053	0.2062	0.2067	0.2059	0.2053	0.2014	0.2014	0.2014	0.2020	0.2023	0.2082
	13.201	0.2582	0.2553	0.2523	0.2494	0.2494	0.2523	0.2538	0.2538	0.2553	0.2559	0.2788
	19.141	0.2935	0.2935	0.2965	0.2965	0.2965	0.2965	0.2965	0.2965	0.3053	0.3082	0.3318
	28.581	0.3435	0.3435	0.3435	0.3465	0.3465	0.3465	0.3465	0.3465	0.3497	0.3524	0.3847

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO RECTANGULAR

- DATOS CONSTANTES:

- P (m.) = 0.20

H (m.)	Rectangular	Q (L/s)	Para 0%, 1% y 2%
		9.104	0.0370
		13.201	0.0515
		19.141	0.0645
28.581	0.0745		

Tabla 4.15: Tirantes tomados aguas arriba

		TIRANTES TOMADOS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (cm.)										
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VERTEDERO LABERINTO TIPO RECTANGULAR	0%	9.104	23.6	23.3	23.6	23.7	23.7	23.8	23.9	24.0	24.0	24.0
		13.201	24.8	24.8	24.8	25.0	25.1	25.1	25.3	25.4	25.3	25.2
		19.141	26.1	26.1	26.2	26.2	26.4	26.5	26.6	26.7	26.7	26.6
		28.581	27.1	27.2	27.2	27.4	27.5	27.6	27.7	27.6	27.7	27.5
	1%	9.104	22.5	22.6	22.7	22.9	23.0	23.2	23.4	23.6	23.6	23.7
		13.201	24.0	24.1	24.2	24.4	24.5	24.7	24.9	25.0	25.0	25.2
		19.141	24.4	25.5	25.5	25.7	25.8	26.1	26.3	26.5	26.5	26.4
		28.581	26.2	26.4	26.6	26.7	26.9	27.2	27.3	27.5	27.5	27.3
	2%	9.104	21.3	21.5	21.8	22.0	22.2	22.6	22.9	23.2	23.3	23.6
		13.201	22.8	23.0	22.7	22.5	22.7	24.0	24.3	24.6	24.7	25.0
		19.141	24.1	24.2	24.6	24.7	25.1	25.4	25.7	26.0	26.2	26.1
		28.581	25.3	25.5	25.6	25.8	26.0	26.5	26.9	27.0	27.2	27.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16: Velocidades tomadas aguas arriba

		VELOCIDADES TOMADAS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (m/s)											
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
VERTEDERO LABERINTO TIPO RECTANGULA R	0%	9.104	0.1673	0.1679	0.1700	0.1717	0.1729	0.1741	0.1759	0.1767	0.1782	0.1906	
		13.201	0.2276	0.2309	0.2415	0.2329	0.2385	0.2385	0.2368	0.2406	0.2494	0.2594	
		19.141	0.2788	0.2729	0.2788	0.2671	0.2582	0.2700	0.2847	0.2847	0.2906	0.3171	
	1%	28.581	0.3024	0.3082	0.3024	0.3053	0.3112	0.2994	0.3082	0.3082	0.3141	0.3259	0.3583
		9.104	0.2044	0.2000	0.1994	0.2012	0.1994	0.1991	0.1985	0.1979	0.1973	0.2120	
		13.201	0.2415	0.2432	0.2435	0.2435	0.2435	0.2459	0.2523	0.2523	0.2553	0.2641	
	2%	19.141	0.3082	0.2965	0.3024	0.2994	0.3053	0.3053	0.3024	0.3024	0.2965	0.3053	0.3259
		28.581	0.3377	0.3347	0.3377	0.3318	0.3406	0.3259	0.3318	0.3288	0.3406	0.3700	
		9.104	0.2229	0.2288	0.2259	0.2288	0.2303	0.2303	0.2335	0.2318	0.2347	0.2700	
	13.201	0.2612	0.2621	0.2641	0.2582	0.2582	0.2585	0.2641	0.2635	0.2591	0.2788		
	19.141	0.3259	0.3230	0.3288	0.3200	0.3288	0.3171	0.3230	0.3200	0.3288	0.3377		
	28.581	0.3406	0.3347	0.3406	0.3288	0.3377	0.3318	0.3435	0.3377	0.3435	0.3524		

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.4. PARA VERTEDERO TIPO LABERINTO CIRCULAR

- DATOS CONSTANTES:

- P (m.) = 0.20

H (m.)	Circular	Q (L/s)	Para 0%, 1% y 2%
		9.104	0.0350
13.201	0.0490		
19.141	0.0620		
28.581	0.0700		

Tabla 4.17: Tirantes tomados aguas arriba

		TIRANTES TOMADOS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (cm.)											
		Pendientes	Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VERTEDERO LABERINTO TIPO CIRCULAR	0%	9.104	23.2	23.2	23.3	23.3	23.3	23.5	23.6	23.7	23.6	23.6	
		13.201	24.6	24.6	24.6	24.7	24.8	24.9	25.0	25.0	25.0	25.0	
		19.141	26.1	26.1	26.1	26.2	26.3	26.3	26.4	26.5	26.4	26.3	
		28.581	26.8	26.8	26.9	27.0	27.1	27.2	27.3	27.4	27.3	27.2	
	1%	9.104	22.3	2.3	22.4	22.7	22.8	23.0	23.2	23.3	23.5	23.5	
		13.201	23.6	23.7	23.8	24.0	24.2	24.4	24.5	24.7	24.8	24.9	
		19.141	25.1	25.3	25.4	25.5	25.6	25.8	26.0	26.1	26.2	26.2	
		28.581	25.9	26.0	26.2	26.4	26.6	26.6	26.9	26.9	27.0	27.0	
	2%	9.104	21.2	21.4	21.6	21.9	22.1	22.4	22.7	22.9	23.2	23.4	
		13.201	22.5	22.7	23.0	23.2	23.4	23.7	23.9	24.3	24.5	24.6	
		19.141	23.9	24.1	24.3	24.6	24.8	25.1	25.4	25.6	25.9	26.0	
		28.581	24.9	25.2	25.4	25.6	25.9	26.1	26.5	26.6	26.8	26.8	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.18: Velocidades tomadas aguas arriba

		VELOCIDADES TOMADAS AGUAS ARRIBA CADA 10 cm. (m/s)										
Pendientes		Qr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0%	9.104	0.1788	0.1803	0.1817	0.1817	0.1817	0.1817	0.1847	0.1876	0.1876	0.1876	0.2023
	13.201	0.2406	0.2406	0.2376	0.2365	0.2347	0.2376	0.2406	0.2406	0.2406	0.2406	0.2612
	19.141	0.2788	0.2729	0.2788	0.2671	0.2582	0.2700	0.2847	0.2847	0.2847	0.2906	0.3171
	28.581	0.3171	0.3171	0.3230	0.3200	0.3141	0.3141	0.3141	0.3141	0.3259	0.3347	0.3583
1%	9.104	0.2053	0.2053	0.2023	0.2053	0.2082	0.2082	0.2465	0.2082	0.2082	0.2112	0.2112
	13.201	0.2406	0.2406	0.2435	0.2465	0.2494	0.2465	0.2435	0.2435	0.2435	0.2406	0.2788
	19.141	0.2906	0.2906	0.2935	0.2935	0.2965	0.2994	0.3024	0.3024	0.3024	0.3053	0.3259
	28.581	0.3318	0.3406	0.3347	0.3318	0.3347	0.3377	0.3406	0.3406	0.3435	0.3671	0.3700
2%	9.104	0.2082	0.2082	0.2082	0.2053	0.2053	0.2053	0.2059	0.2053	0.2038	0.2023	0.2082
	13.201	0.2553	0.2553	0.2523	0.2523	0.2523	0.2523	0.2523	0.2494	0.2494	0.2494	0.2641
	19.141	0.3288	0.3230	0.3200	0.3171	0.3171	0.3200	0.3200	0.3200	0.3215	0.3200	0.3406
	28.581	0.3759	0.3730	0.3671	0.3671	0.3671	0.3612	0.3612	0.3583	0.3641	0.3671	0.4083

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. OBJETIVO N° 03: MEDICIONES PARA DETERMINAR RESALTO HIDRÁULICO.

4.2.3.1. VERTEDERO TIPO RECTANGULAR

Los datos, tirantes y velocidades, fueron tomados después de no haberse apreciado ningún cambio en el comportamiento del flujo durante su recorrido aguas abajo en el canal de pendiente variable.

Tabla 4.19: Tirantes y velocidades aguas abajo, vertedero tipo rectangular sin contracciones laterales.

Q (l/s)	Pendiente		Datos tomados a cada 10 cm.									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.104	0%	Tirantes (cm)	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2
		Velocidad (m/s)	1.7831	1.7999	1.8608	1.9381	1.8216	1.1658	1.4754	1.7213	1.6272	1.7019
	1%	Tirantes (cm)	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
		Velocidad (m/s)	1.6110	1.2947	1.7013	1.6528	1.7719	1.3859	1.5948	1.7999	1.7125	1.7660
	2%	Tirantes (cm)	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2
		Velocidad (m/s)	1.7704	1.3741	1.9111	1.8116	1.9214	1.8978	1.6713	1.8764	1.7275	1.9611
13.201	0%	Tirantes (cm)	3.2	3.0	3.1	3.0	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9	2.9
		Velocidad (m/s)	0.9737	0.8843	1.2306	1.3615	1.4086	1.2900	1.2829	1.2859	1.2947	1.3253
	1%	Tirantes (cm)	3.2	3.2	3.0	2.7	2.7	2.5	2.7	3.0	2.9	2.9
		Velocidad (m/s)	1.7048	1.5077	1.6313	1.5174	1.4330	1.3968	1.3624	1.3997	1.3859	1.4321
	2%	Tirantes (cm)	3.0	2.6	2.6	2.4	2.4	2.4	2.5	2.7	2.6	2.6
		Velocidad (m/s)	1.7204	1.5095	1.5468	1.6242	1.5233	1.4212	1.3968	1.3371	1.4027	1.4724
19.141	0%	Tirantes (cm)	2.6	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6
		Velocidad (m/s)	1.5733	1.5733	1.4792	1.4380	1.3762	1.3733	1.3556	1.3468	1.3527	1.3850
	1%	Tirantes (cm)	3.4	3.4	3.4	3.2	3.0	3.0	3.3	3.3	3.3	3.2
		Velocidad (m/s)	1.6233	1.6175	1.5174	1.5057	1.4292	1.4292	1.4203	1.4174	1.4586	1.4556
	2%	Tirantes (cm)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1
		Velocidad (m/s)	1.6057	1.5939	1.5645	1.4851	1.4468	1.4292	1.4292	1.4262	1.4586	1.4586
28.581	0%	Tirantes (cm)	3.7	3.7	3.5	3.3	3.4	3.4	3.5	3.7	3.7	3.8
		Velocidad (m/s)	1.3506	1.4292	1.5889	1.5792	1.5360	1.5233	1.5371	1.5380	1.5448	1.5557
	1%	Tirantes (cm)	3.5	3.7	3.8	3.5	3.5	3.5	3.7	3.7	3.8	3.9
		Velocidad (m/s)	1.7754	1.7322	1.6645	1.6616	1.5430	1.5468	1.5566	1.5616	1.5695	1.5616
	2%	Tirantes (cm)	3.3	3.2	3.2	3.0	3.4	3.5	3.5	3.6	3.6	3.7
		Velocidad (m/s)	1.8052	1.7528	1.6654	1.6616	1.6248	1.6186	1.6307	1.6616	1.6704	1.6645

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. VERTEDEROS TIPO LABERINTO

Los datos fueron tomados después de haberse apreciado un cambio brusco en las alturas de los tirantes aguas abajo.

- TIRANTES PARA DETERMINAR RESALTO HIDRÁULICO:

Los tirantes fueron tomados en centímetros y posteriormente convertidos a metros para un mejor manejo de datos. Representan Y₁: tirante conjugado menor y Y₂: tirante conjugado mayor.

Tabla 4.20: Tirantes de resalto hidráulico con vertederos tipo laberinto

Tipo de vertedero laberinto	Q (l/s)	Pendientes					
		0%		1%		2%	
		Y1 (m)	Y2 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)
TRIANGULAR	9.104	0.019	0.061	0.01	0.048	0.009	0.038
	13.201	0.012	0.072	0.009	0.051	0.008	0.043
	19.141	0.01	0.088	0.007	0.056	0.008	0.041
	28.581	0.011	0.05	0.014	0.038	0.01	0.04
TRAPEZOIDAL	9.104	0.015	0.056	0.007	0.044	0.005	0.023
	13.201	0.011	0.063	0.008	0.053	0.008	0.037
	19.141	0.009	0.083	0.007	0.067	0.005	0.041
	28.581	0.011	0.054	0.009	0.047	0.011	0.045
RECTANGULAR	9.104	0.014	0.056	0.007	0.029	0.005	0.021
	13.201	0.005	0.039	0.007	0.034	0.006	0.033
	19.141	0.009	0.039	0.005	0.037	0.011	0.038
	28.581	0.009	0.046	0.009	0.046	0.011	0.043
CIRCULAR	9.104	0.012	0.055	0.011	0.029	0.009	0.022
	13.201	0.007	0.044	0.008	0.033	0.006	0.029
	19.141	0.007	0.043	0.006	0.039	0.005	0.036
	28.581	0.006	0.038	0.013	0.038	0.014	0.039

Fuente: Elaboración propia

- VELOCIDADES TOMADAS EN RESALTO HIDRAULICO:

Los datos fueron tomados en unidades de frecuencia (hz) y convertidos en unidades de velocidad (m/s) para un mejor manejo

de los cálculos. Representan V_1 : velocidad en el tirante conjugado menor y V_2 : velocidad en el tirante conjugado mayor.

Tabla 4.21: Velocidades (m/s) usando vertederos tipo laberinto

Tipo de vertedero laberinto	Q (l/s)	Pendientes					
		0%		1%		2%	
		V1 (m/s)	V2 (m/s)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V1 (m/s)	V2 (m/s)
TRIANGULAR	9.104	32.2	8.9	34.1	14.1	39.2	28.6
	13.201	39.1	11.3	36.1	16.1	33.5	31.5
	19.141	46.1	15.2	40.1	19.3	50.1	36.9
	28.581	51.0	41.0	51.5	42.9	53	43.1
TRAPEZOIDAL	9.104	32.3	9.6	35.3	18.2	50.3	29.1
	13.201	38.2	14.2	37.7	17.2	48.3	31.4
	19.141	43.9	14.1	44.1	21.1	49.2	35.1
	28.581	46.6	34.1	48.1	38.0	44.7	38
RECTANGULAR	9.104	34.2	14.4	40.0	29.5	47.2	36.5
	13.201	36.2	22.2	46.8	35.4	50.6	36.5
	19.141	57.8	37.2	60.1	39.9	63.2	41.2
	28.581	66.4	40.9	65.3	42.1	71.4	45.6
CIRCULAR	9.104	33.3	11.9	34.0	25.5	43.5	28.7
	13.201	35.2	20.1	40.4	28.7	46.3	32.3
	19.141	42.3	34.8	40.9	35.5	41.7	37.9
	28.581	51.4	41.0	52.6	42.1	51.3	42.1

Fuente: Elaboración propia

- TIRANTES Y VELOCIDADES AGUAS ABAJO, DESPUÉS DEL RESALTO HIDRÁULICO

Los tirantes y velocidades fueron tomados en centímetros y hercios, respectivamente. Los datos fueron tomados a cada 10 cm. aguas abajo, desde la terminación del resalto hidráulico.

Tabla 4.22: Tirantes y velocidades después del resalto hidráulico de vertedero laberinto tipo triangular.

		Datos tomados a cada 10 cm.									
Q (l/s)	Pendiente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.104	Tirantes (cm)	6.1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Velocidad (m/s)	0.420	0.423	0.426	0.420	0.417	0.417	0.420	0.417	0.417	0.417
	Tirantes (cm)	4.8	4.8	4.7	4.8	4.9	4.9	4.8	4.9	4.8	4.8
13.201	Velocidad (m/s)	0.605	0.602	0.605	0.608	0.605	0.605	0.605	0.602	0.602	0.605
	Tirantes (cm)	3.3	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.2
	Velocidad (m/s)	0.917	0.926	0.967	0.980	0.987	1.011	1.025	1.070	1.146	1.159
19.141	Tirantes (cm)	6.8	7.0	6.9	7.0	7.0	6.8	6.9	7.0	7.0	6.9
	Velocidad (m/s)	0.488	0.485	0.497	0.491	0.494	0.494	0.491	0.494	0.494	0.497
	Tirantes (cm)	5.1	5.1	5.2	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.1	5.2
28.581	Velocidad (m/s)	0.632	0.635	0.635	0.635	0.632	0.638	0.638	0.632	0.632	0.638
	Tirantes (cm)	3.8	3.8	3.9	3.7	3.7	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4
	Velocidad (m/s)	1.011	1.017	1.006	1.000	1.008	1.017	1.044	1.044	1.044	1.035
VERTEDERO LABERINTO TRIANGULAR	Tirantes (cm)	8.9	9.0	8.9	8.9	9.0	8.9	8.9	9.0	8.8	8.9
	Velocidad (m/s)	0.605	0.611	0.608	0.594	0.605	0.602	0.602	0.600	0.605	0.605
	Tirantes (cm)	5.5	5.4	5.3	5.3	5.3	5.5	5.5	5.5	5.4	5.5
VERTEDERO LABERINTO TRIANGULAR	Velocidad (m/s)	0.667	0.670	0.670	0.667	0.664	0.670	0.673	0.670	0.670	0.664
	Tirantes (cm)	4.0	4.1	4.4	4.4	4.3	4.1	4.1	4.2	4.2	4.3
	Velocidad (m/s)	1.179	1.185	1.190	1.217	1.218	1.214	1.205	1.217	1.261	1.261
VERTEDERO LABERINTO TRIANGULAR	Tirantes (cm)	4.7	4.7	4.8	4.8	4.9	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9
	Velocidad (m/s)	1.329	1.306	1.362	1.351	1.334	1.286	1.261	1.282	1.285	1.285
	Tirantes (cm)	4.0	4.0	4.1	4.2	4.2	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4
VERTEDERO LABERINTO TRIANGULAR	Velocidad (m/s)	1.317	1.320	1.341	1.344	1.353	1.332	1.322	1.329	1.330	1.330
	Tirantes (cm)	1.0	4.2	4.5	4.6	4.6	4.5	4.5	4.6	4.5	4.6
	Velocidad (m/s)	1.361	1.382	1.441	1.444	1.447	1.400	1.347	1.361	1.373	1.394

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.23: Tirantes y velocidades después del resalto hidráulico de vertedero laberinto tipo trapezoidal.

		Datos tomados a cada 10 cm.									
Q (l/s)	Pendiente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.104	Tirantes (cm)	5.8	5.9	5.9	5.8	5.9	5.9	5.9	5.8	5.8	5.9
	Velocidad (m/s)	0.399	0.398	0.397	0.405	0.417	0.423	0.438	0.445	0.447	0.447
	Tirantes (cm)	4.4	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	4.5	4.4	4.6	4.5
	Velocidad (m/s)	0.635	0.632	0.638	0.641	0.635	0.647	0.638	0.638	0.641	0.641
13.201	Tirantes (cm)	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.7	2.7
	Velocidad (m/s)	1.016	1.014	1.091	1.044	0.997	1.011	1.029	1.024	1.014	1.014
	Tirantes (cm)	6.3	6.2	6.2	6.3	6.3	6.2	6.3	6.2	6.2	6.2
	Velocidad (m/s)	0.597	0.602	0.620	0.602	0.614	0.629	0.629	0.629	0.632	0.632
19.141	Tirantes (cm)	5.3	5.3	5.4	5.5	5.5	5.4	5.3	5.4	5.5	5.3
	Velocidad (m/s)	0.691	0.691	0.694	0.700	0.691	0.697	0.694	0.694	0.691	0.697
	Tirantes (cm)	3.6	3.6	3.7	3.8	3.8	3.7	3.8	3.7	3.8	3.9
	Velocidad (m/s)	1.053	1.041	1.020	1.047	1.044	1.047	1.050	1.085	1.088	1.088
28.581	Tirantes (cm)	8.4	8.3	8.3	8.3	8.4	8.3	8.3	8.4	8.4	8.4
	Velocidad (m/s)	0.635	0.637	0.638	0.657	0.658	0.655	0.635	0.658	0.676	0.676
	Tirantes (cm)	6.5	6.4	6.5	6.5	6.6	6.6	6.5	6.5	6.4	6.4
	Velocidad (m/s)	0.888	0.882	0.882	0.888	0.885	0.887	0.885	0.888	0.888	0.888
VERTEDERO LABERINTO TRAPEZOIDAL	Tirantes (cm)	4.1	4.1	4.1	4.0	4.1	4.2	4.2	4.3	4.2	4.3
	Velocidad (m/s)	1.135	1.135	1.132	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.147	1.135
	Tirantes (cm)	5.4	5.3	5.3	5.4	5.4	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5
	Velocidad (m/s)	1.129	1.132	1.135	1.135	1.138	1.126	1.117	1.100	1.100	1.097
VERTEDERO LABERINTO TRAPEZOIDAL	Tirantes (cm)	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.8	4.9	4.9	5.0
	Velocidad (m/s)	1.250	1.247	1.244	1.241	1.220	1.220	1.220	1.220	1.223	1.224
	Tirantes (cm)	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8	4.7	4.8	4.9
	Velocidad (m/s)	1.229	1.247	1.256	1.256	1.259	1.256	1.256	1.256	1.261	1.261

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.24: Tirantes y velocidades después del resalto hidráulico de vertedero laberinto tipo rectangular.

Q (l/s)		Pendiente	Datos tomados a cada 10 cm.												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
VERTEDERO LABERINTO RECTANGULAR			9.104	Tirantes (cm)	5.5	5.4	5.6	5.6	5.4	5.4	5.4	5.5	5.4	5.5	5.4
				Velocidad (m/s)	0.508	0.505	0.514	0.508	0.514	0.511	0.526	0.526	0.535	0.529	
				Tirantes (cm)	2.4	2.3	2.5	2.7	2.9	2.5	2.5	2.6	2.8	2.9	
			13.201	Velocidad (m/s)	0.932	0.939	0.937	0.955	0.964	0.938	0.901	0.926	0.935	0.932	
				Tirantes (cm)	2.1	2.1	2.0	2.0	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	
				Velocidad (m/s)	1.079	1.023	1.000	1.106	1.144	1.111	1.073	1.073	1.064	1.044	
			19.141	Tirantes (cm)	3.9	4.0	4.0	4.1	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	
				Velocidad (m/s)	0.694	0.691	0.697	0.694	0.694	0.691	0.694	0.691	0.694	0.691	
				Tirantes (cm)	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	
			28.581	Velocidad (m/s)	1.132	1.132	1.126	1.126	1.138	1.138	1.141	1.106	1.082	1.103	
				Tirantes (cm)	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.4	3.5	3.6	
				Velocidad (m/s)	1.141	1.138	1.132	1.132	1.153	1.147	1.147	1.145	1.138	0.203	
9.104	Tirantes (cm)	3.9	3.8	3.9	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8	3.9	3.9				
	Velocidad (m/s)	1.194	1.182	1.185	1.179	1.197	1.197	1.194	1.170	1.161	1.182				
	Tirantes (cm)	3.5	3.5	3.6	3.6	3.6	3.7	3.6	3.7	3.6	3.7				
13.201	Velocidad (m/s)	1.244	1.250	1.247	1.259	1.273	1.267	1.273	1.261	1.267	1.270				
	Tirantes (cm)	3.6	3.7	3.7	3.7	3.8	3.7	3.7	3.7	3.8	3.8				
	Velocidad (m/s)	1.297	1.294	1.288	1.294	1.309	1.303	1.311	1.300	1.326	1.309				
19.141	Tirantes (cm)	4.4	4.4	4.5	4.5	4.6	4.6	4.5	4.5	4.6	4.6				
	Velocidad (m/s)	1.273	1.220	1.303	1.256	1.282	1.250	1.244	1.223	1.256	1.220				
	Tirantes (cm)	4.6	4.6	4.6	4.7	4.6	4.7	4.8	4.8	4.8	4.7				
28.581	Velocidad (m/s)	1.279	1.297	1.320	1.253	1.288	1.232	1.279	1.250	1.303	1.220				
	Tirantes (cm)	4.2	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.5				
	Velocidad (m/s)	1.338	1.309	1.326	1.267	1.326	1.326	1.326	1.282	1.338	1.250				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.25: Tirantes y velocidades después del resalto hidráulico de vertedero laberinto tipo circular.

		Datos tomados a cada 10 cm.									
Q (l/s)	Pendiente	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.104	Tirantes (cm)	5.5	5.5	5.4	5.5	5.5	5.4	5.4	5.5	5.5	5.4
	Velocidad (m/s)	0.441	0.444	0.447	0.444	0.441	0.449	0.452	0.452	0.455	0.455
	Tirantes (cm)	2.9	3.1	3.0	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	3.0	2.9
	Velocidad (m/s)	0.832	0.835	0.853	0.838	0.832	0.835	0.876	0.864	0.811	0.805
13.201	Tirantes (cm)	2.2	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6
	Velocidad (m/s)	0.917	0.923	0.950	0.941	0.944	0.947	0.950	0.953	0.960	0.961
	Tirantes (cm)	4.4	4.5	4.6	4.5	4.4	4.7	4.5	4.6	4.5	4.5
	Velocidad (m/s)	0.691	0.691	0.688	0.691	0.694	0.694	0.694	0.691	0.697	0.694
19.141	Tirantes (cm)	3.3	3.2	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.6
	Velocidad (m/s)	0.958	0.958	0.958	0.982	0.991	0.985	0.958	0.982	0.982	0.985
	Tirantes (cm)	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3
	Velocidad (m/s)	1.050	1.073	1.094	1.091	1.091	1.067	1.061	1.070	1.073	1.073
28.581	Tirantes (cm)	3.6	3.6	3.7	3.7	4.3	3.8	3.8	3.9	3.9	4.1
	Velocidad (m/s)	1.082	1.088	1.097	1.079	1.079	1.041	1.035	1.035	1.038	1.038
	Tirantes (cm)	3.7	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8	3.9	4.0
	Velocidad (m/s)	1.132	1.135	1.138	1.129	1.132	1.126	1.100	1.095	1.097	1.096
VERTEDERO LABERINTO CIRCULAR	Tirantes (cm)	3.6	3.6	3.7	3.6	3.6	3.7	3.6	3.7	3.7	3.8
	Velocidad (m/s)	1.206	1.206	1.209	1.217	1.220	1.220	1.223	1.217	1.203	1.200
	Tirantes (cm)	3.9	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	4.0	4.1	4.1	4.2
	Velocidad (m/s)	1.335	1.335	1.332	1.382	1.464	1.306	1.250	1.247	1.235	1.235
VERTEDERO LABERINTO CIRCULAR	Tirantes (cm)	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	4.0	4.1	4.1
	Velocidad (m/s)	1.291	1.306	1.338	1.291	1.303	1.306	1.320	1.306	1.311	1.311
	Tirantes (cm)	3.6	3.6	3.7	3.8	3.9	3.9	4.0	4.1	4.1	4.1
	Velocidad (m/s)	1.385	1.394	1.423	1.429	1.441	1.409	1.376	1.379	1.382	1.382

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE DESCARGA

5.1.1. SEGÚN FÓRMULA GENERAL PARA VERTEDEROS

La ecuación modelo utilizada para vertederos experimentales es del tipo exponencial, representada por:

$$Q = KH^n$$

En la cual se conocen los valores de H y se necesitan encontrar los de K y n, los cuales se calcular aplicando logaritmos a la ecuación:

$$\log Q = \log K + n \log H$$

De donde se observa que tiene la forma de la ecuación general de una recta:

$$Y = mX + b$$

Donde: $Y = \log Q$

$$m = n$$

$$X = \log H$$

$$b = \log K$$

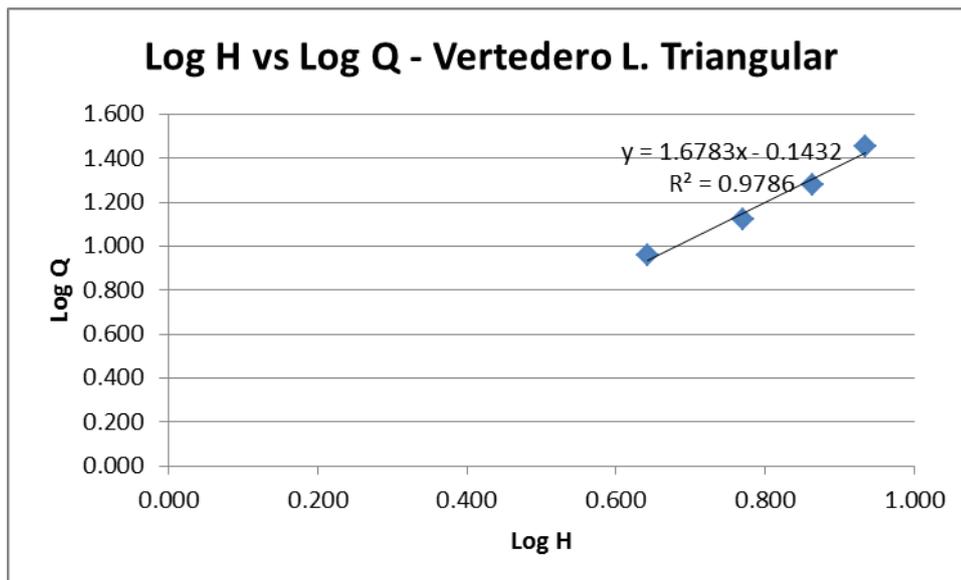
- **Aplicación del procedimiento:**

Tabla 5.1: Logaritmos de Caudales reales y de cargas

	H (cm)	Q (L/s)	Log H	Log Q
Vertedero L. Triangular	4.400	9.104	0.643	0.959
	5.900	13.201	0.771	1.121
	7.300	19.141	0.863	1.282
	8.600	28.581	0.934	1.456
Vertedero L. Trapezoidal	3.750	9.104	0.574	0.959
	5.100	13.201	0.708	1.121
	6.500	19.141	0.813	1.282
	7.700	28.581	0.886	1.456
Vertedero L. Rectangular	3.700	9.104	0.568	0.959
	5.150	13.201	0.712	1.121
	6.450	19.141	0.810	1.282
	7.450	28.581	0.872	1.456
Vertedero L. Circular	3.500	9.104	0.544	0.959
	4.900	13.201	0.690	1.121
	6.200	19.141	0.792	1.282
	7.000	28.581	0.845	1.456

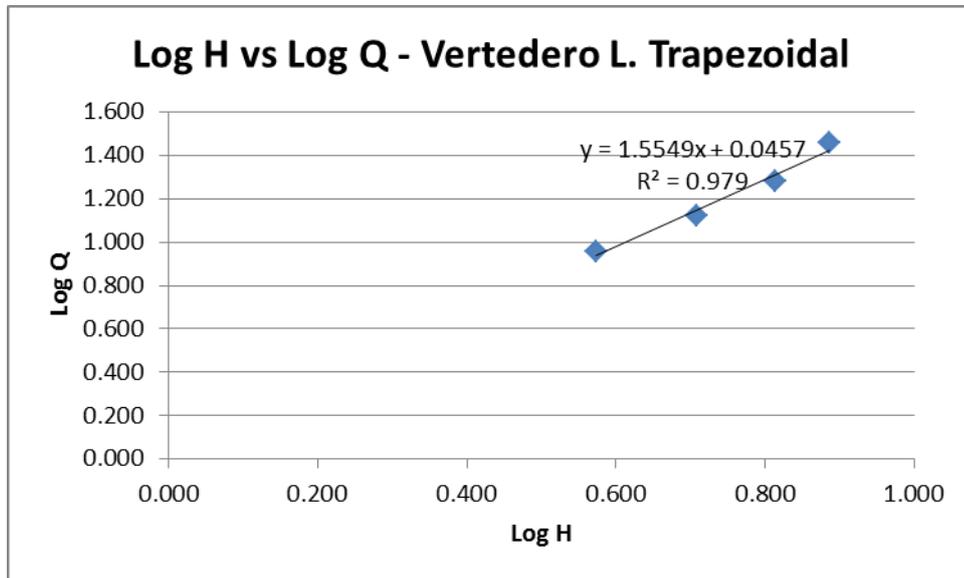
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.1: Logaritmos de caudal y cargas H en vertedero laberinto triangular



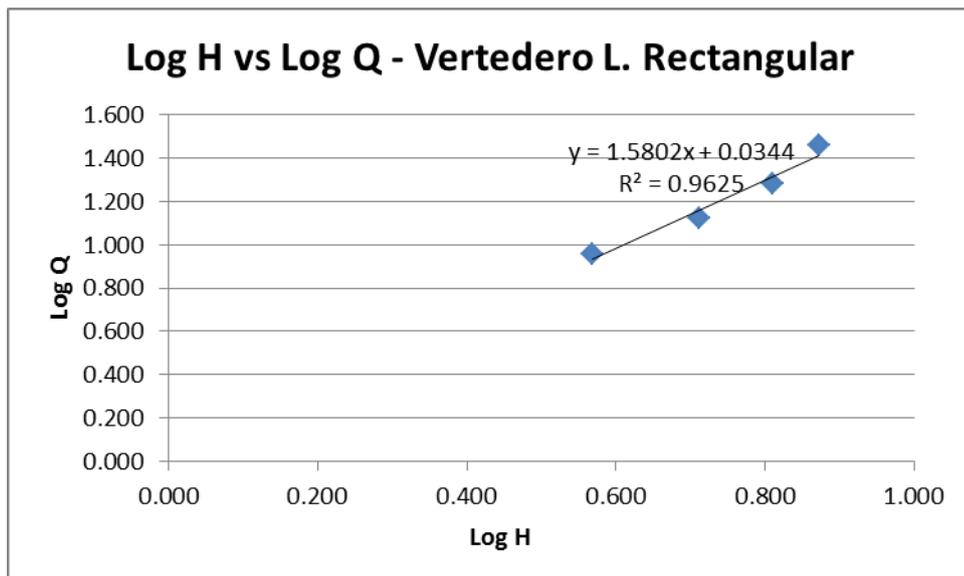
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.2: Logaritmos de caudal y cargas H en vertedero laberinto trapezoidal



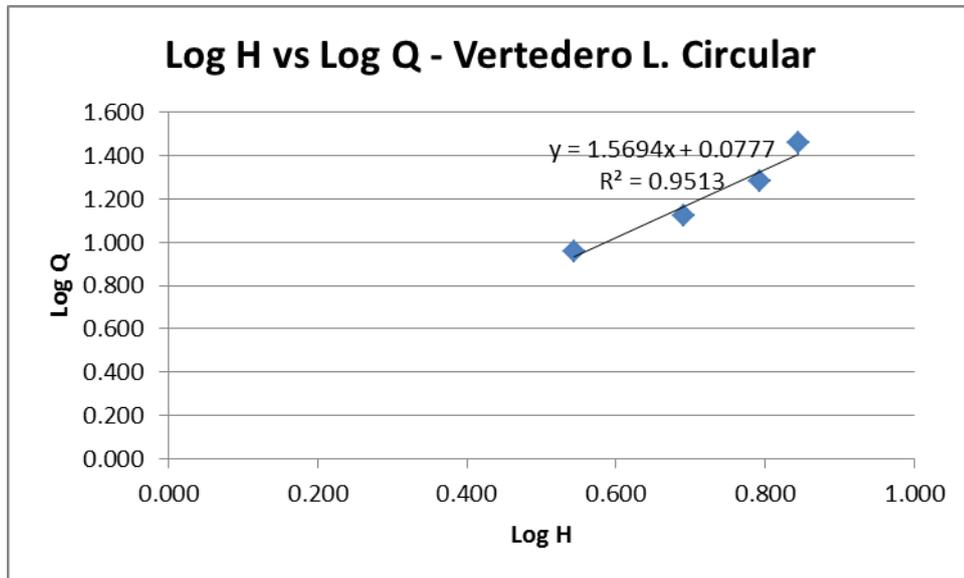
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.3: Logaritmos de caudal y cargas H en vertedero laberinto rectangular



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.4: Logaritmos de caudal y cargas H en vertedero laberinto circular



Fuente: Elaboración Propia

De los gráficos se obtienen diferentes ecuaciones según el tipo de vertedero ensayado:

a. Vertedero Laberinto Triangular:

$$y = 1.6783x - 0.1432$$

De donde: $n = 1.6783$ y $k = 0.7191$

b. Vertedero Laberinto Trapezoidal:

$$y = 1.5549x + 0.0457$$

De donde: $n = 1.5549$ y $k = 1.1110$

c. Vertedero Laberinto Rectangular:

$$y = 1.5802x + 0.0344$$

De donde: $n = 1.5802$ y $k = 1.0824$

d. Vertedero Laberinto Circular:

$$y = 1.5694x + 0.0777$$

De donde: $n = 1.5694$ y $k = 1.1959$

Con los parámetros anteriores se obtienen las ecuaciones generadas específicas para cada vertedero tipo laberinto:

a. Vertedero Laberinto Triangular

$$Q = 0.7191H^{1.6783}$$

b. Vertedero Laberinto Trapezoidal

$$Q = 1.1110H^{1.5549}$$

c. Vertedero Laberinto Rectangular

$$Q = 1.0824H^{1.5802}$$

d. Vertedero Laberinto Circular

$$Q = 1.1959H^{1.5694}$$

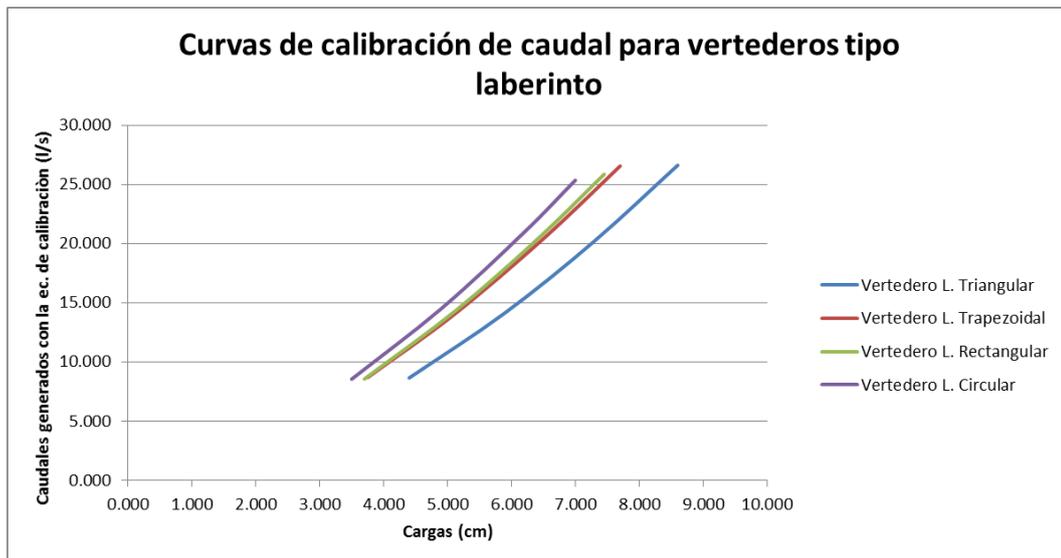
Con las ecuaciones de calibración generadas se calculan los caudales generados y se comparan resultados, a la vez se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de los vertederos:

Tabla 5.2: Caudales observados y generados con las ecuaciones de calibración

	H (cm)	Q real(L/s)	Log H	Log Q	Q (L/s) Ec. Generada	error
Vertedero L. Triangular	4.400	9.104	0.643	0.959	8.644	5.05%
	5.900	13.201	0.771	1.121	14.142	7.13%
	7.300	19.141	0.863	1.282	20.217	5.62%
	8.600	28.581	0.934	1.456	26.618	6.87%
Vertedero L. Trapezoidal	3.750	9.104	0.574	0.959	8.675	4.71%
	5.100	13.201	0.708	1.121	13.993	6.00%
	6.500	19.141	0.813	1.282	20.403	6.59%
	7.700	28.581	0.886	1.456	26.552	7.10%
Vertedero L. Rectangular	3.700	9.104	0.568	0.959	8.556	6.02%
	5.150	13.201	0.712	1.121	14.428	9.29%
	6.450	19.141	0.810	1.282	20.590	7.57%
	7.450	28.581	0.872	1.456	25.857	9.53%
Vertedero L. Circular	3.500	9.104	0.544	0.959	8.542	6.17%
	4.900	13.201	0.690	1.121	14.484	9.72%
	6.200	19.141	0.792	1.282	20.955	9.47%
	7.000	28.581	0.845	1.456	25.351	11.30%

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.5: Curvas de gasto para vertederos tipo laberinto



Fuente: Elaboración Propia

5.1.2. SEGÚN FÓRMULA GENERAL CAUDAL – TEÓRICO

Tullis, Amanian y Waldron (1995) utilizan la ecuación general caudal – teórica basada en elementos del vertedero, flujo descargado y la carga hidráulica:

$$Ql = Cd * L * \frac{2}{3} * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

Donde Ql = caudal de descarga del vertedero en laberinto, Cd = coeficiente de descarga, L = longitud efectiva (total), g = aceleración de gravedad y H = la carga hidráulica.

Se calculará un caudal teórico Qt (l/s) empleando la siguiente fórmula general modificada:

$$Qt = \frac{2}{3} * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

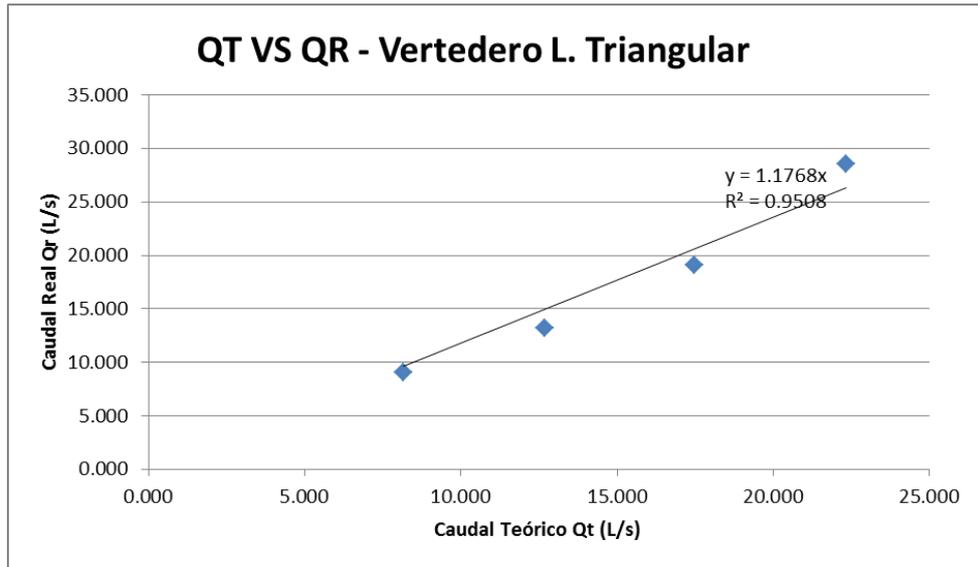
Tabla 5.3: Caudales teóricos y reales calculados.

Tipo de vertedero laberinto	Qt (l/s)	Qr (l/s)
Triangular	8.176	9.104
	12.696	13.201
	17.473	19.141
	22.342	28.581
Trapezoidal	6.433	9.104
	10.203	13.201
	14.681	19.141
	18.928	28.581
Rectangular	6.305	9.104
	10.354	13.201
	14.512	19.141
	18.014	28.581
Circular	5.801	9.104
	9.609	13.201
	13.676	19.141
	16.407	28.581

Fuente: Elaboración propia

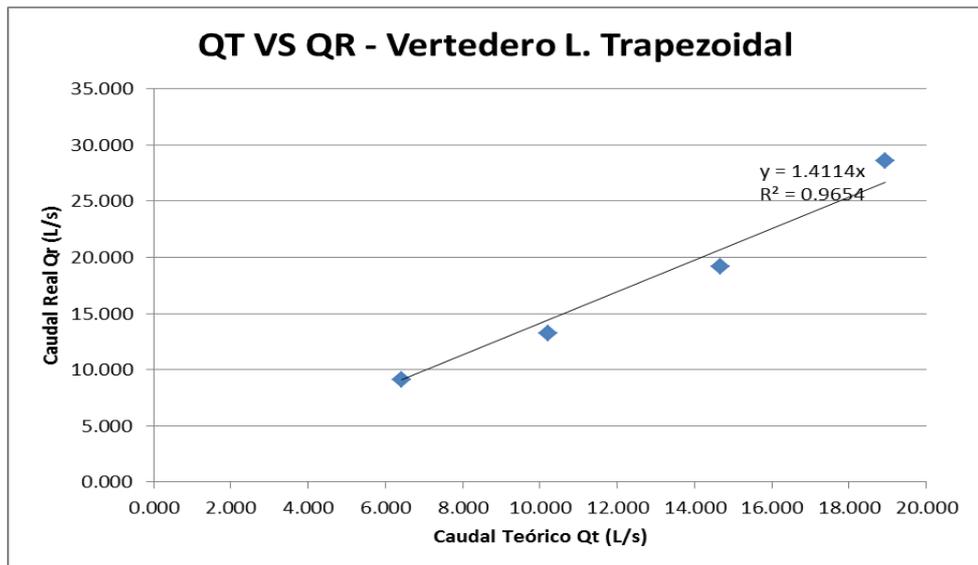
De esta manera definiremos al coeficiente de descarga C_d como una constante o valor de corrección calculado en la comparación lineal entre los caudales teóricos Q_t (l/s) y los caudales reales Q_r (l/s) anteriormente calibrados.

Gráfica 5.6: Caudales teórico y caudales reales



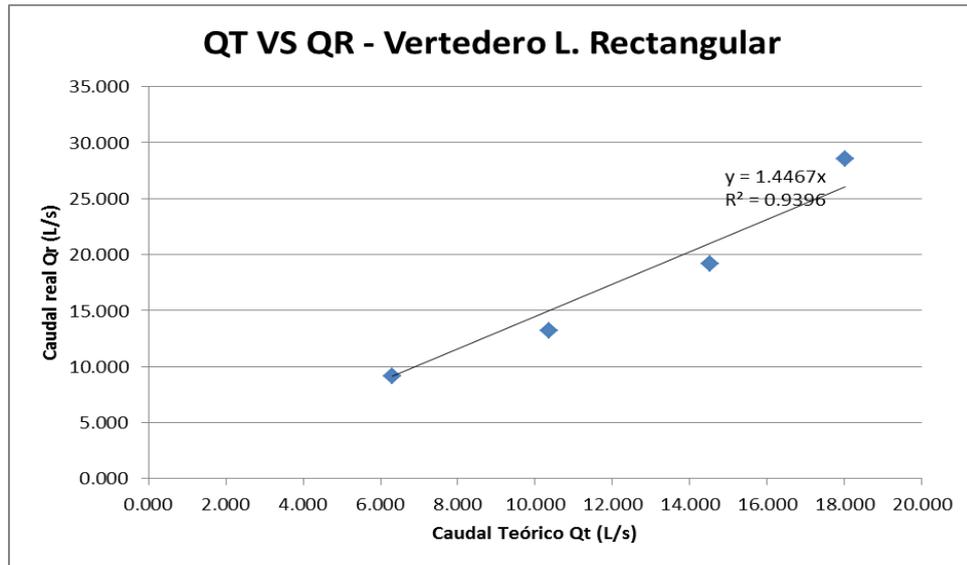
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.7: Caudales teórico y caudales reales



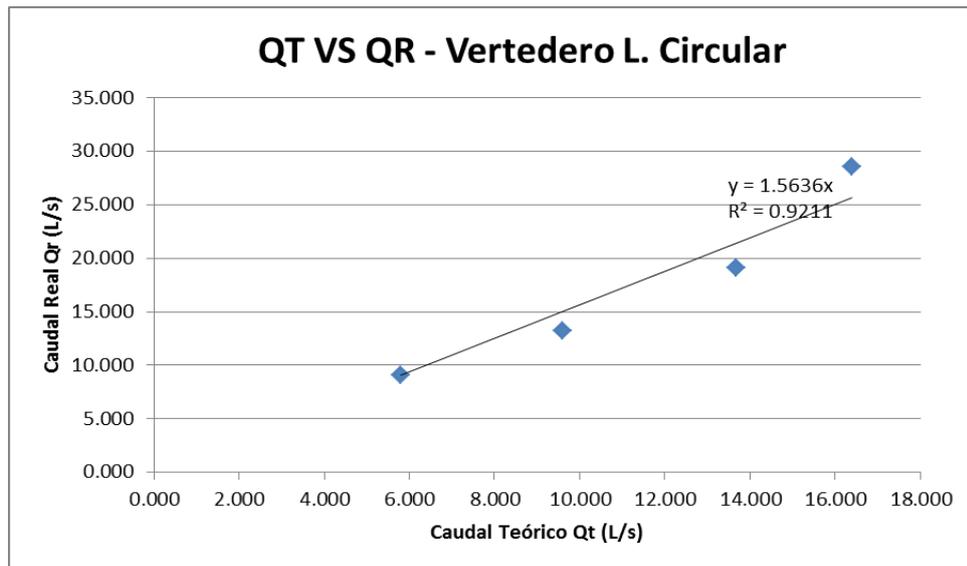
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.8: Caudales teórico y caudales reales



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.9: Caudales teórico y caudales reales



Fuente: Elaboración propia

Las gráficas mostradas nos arrojaron una ecuación lineal de la recta:

$$y = kx$$

Donde: y = Caudal real (l/s)
 k = coeficiente de descarga (valor de corrección)
 x = Caudal teórico (l/s)

Con las ecuaciones de calibración generadas se calculan los caudales teóricos calibrados y se comparan resultados, a la vez se estima el porcentaje de error entre ambos:

a. Vertedero Laberinto Triangular

$$C_d = 1.1768$$

$$Ql = 1.1768 * 2/3 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

$$Ql = 0.7845 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

b. Vertedero Laberinto Trapezoidal

$$C_d = 1.4114$$

$$Ql = 1.4114 * 2/3 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

$$Ql = 0.9409 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

c. Vertedero Laberinto Rectangular

$$C_d = 1.4467$$

$$Ql = 1.4467 * 2/3 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

$$Ql = 0.9645 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

d. Vertedero Laberinto Circular

$$C_d = 1.5636$$

$$Ql = 1.5636 * 2/3 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

$$Ql = 1.0424 * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

Tabla 5.4: Caudales teóricos rectificado, Caudales reales y porcentajes de error.

Tipo de vertedero laberinto	Qt (L/s)	Qr (L/s)	Error	Qt rectificado (L/s)	Qr (L/s)	Error
Triangular	8.176	9.104	10.19%	9.622	9.104	5.69%
	12.696	13.201	3.83%	14.940	13.201	13.18%
	17.473	19.141	8.72%	20.562	19.141	7.42%
	22.342	28.581	21.83%	26.292	28.581	8.01%
Trapezoidal	6.433	9.104	29.34%	9.080	9.104	0.27%
	10.203	13.201	22.71%	14.401	13.201	9.09%
	14.681	19.141	23.30%	20.720	19.141	8.25%
Rectangular	18.928	28.581	33.77%	26.716	28.581	6.53%
	6.305	9.104	30.75%	9.121	9.104	0.19%
	10.354	13.201	21.57%	14.979	13.201	13.47%
	14.512	19.141	24.19%	20.994	19.141	9.68%
Circular	18.014	28.581	36.97%	26.061	28.581	8.82%
	5.801	9.104	36.28%	9.070	9.104	0.37%
	9.609	13.201	27.21%	15.024	13.201	13.81%
	13.676	19.141	28.55%	21.384	19.141	11.72%
	16.407	28.581	42.60%	25.654	28.581	10.24%

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. SEGÚN FÓRMULA PROPUESTA POR TULLIS – AMANIAN – WALDRON (1995)

Tullis, Amanian y Waldron (1995) proponen una fórmula mejorada para el cálculo de coeficiente de descarga C_d basados en investigaciones realizadas en el Utah Water Research Laboratory (UWRL). La fórmula está en función de la carga del vertedero H , el ángulo de abertura α y la altura del vertedero P .

$$C_d = f(H, \alpha, P)$$

$$C_d = a + b * \left(\frac{H}{P}\right) + c * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + d * \left(\frac{H}{P}\right)^3 + e * \left(\frac{H}{P}\right)^4$$

Siendo los valores de a, b, c, d y e mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5.5: Valores de los coeficientes a, b, c, d y e según el ángulo de apertura del vertedero

α (°)	a	b	c	d	e
6	0.49	-0.24	-1.20	2.17	-1.03
8	0.49	1.08	-5.27	6.79	-2.83
12	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
15	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
18	0.49	1.32	-4.13	4.24	-1.50
25	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05
35	0.49	1.69	-4.05	3.62	-1.10

Fuente:

Tullis, Amanian y Waldron (1995)

Esta fórmula presenta restricciones para vertederos con ángulos menores a 6° o mayores a 35°. Debido a que no se realizaron ensayos para vertederos rectangulares ni circulares, se usarán los coeficientes de descarga corregidos por la fórmula general caudal – teórico para generar las ecuaciones calibradas del coeficiente de descarga en función de la relación H/P.

- **Aplicación de la fórmula propuesta por Tullis, Amanian y Waldron (1995):**

Tabla 5.6: Relación H/P según el caudal y vertedero ensayado.

Tipo de vertedero laberinto	Q (L/s)	H/P (cm)
Triangular	9.104	0.220
	13.201	0.295
	19.141	0.365
	28.581	0.430
Trapezoidal	9.104	0.188
	13.201	0.255
	19.141	0.325
	28.581	0.385

Fuente: Elaboración propia

Para los vertederos laberinto tipo triangular y trapezoidal se usaron ángulos de apertura de 25° y 12°, respectivamente.

Tabla 5.7: ángulos de apertura de los vertederos ensayados

Tipo de vertedero laberinto	α (°)	a	b	c	d	e
Trapezoidal	12	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
Triangular	25	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.8: Coeficiente de descarga calculado según el tipo de vertedero ensayado

Tipo de vertedero laberinto	Cd
Triangular	0.6706
	0.6815
	0.6776
	0.6656
Trapezoidal	0.5647
	0.5498
	0.5224
	0.4938

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de coeficiente de descarga obtenidos, se calcularon los caudales teóricos Q_t y fueron comparados linealmente con los caudales reales Q_r antes calibrados. Las gráficas arrojan la ecuación lineal:

$$y = kx$$

Donde:

y = Caudal real Q_r (l/s)

k = factor de calibración

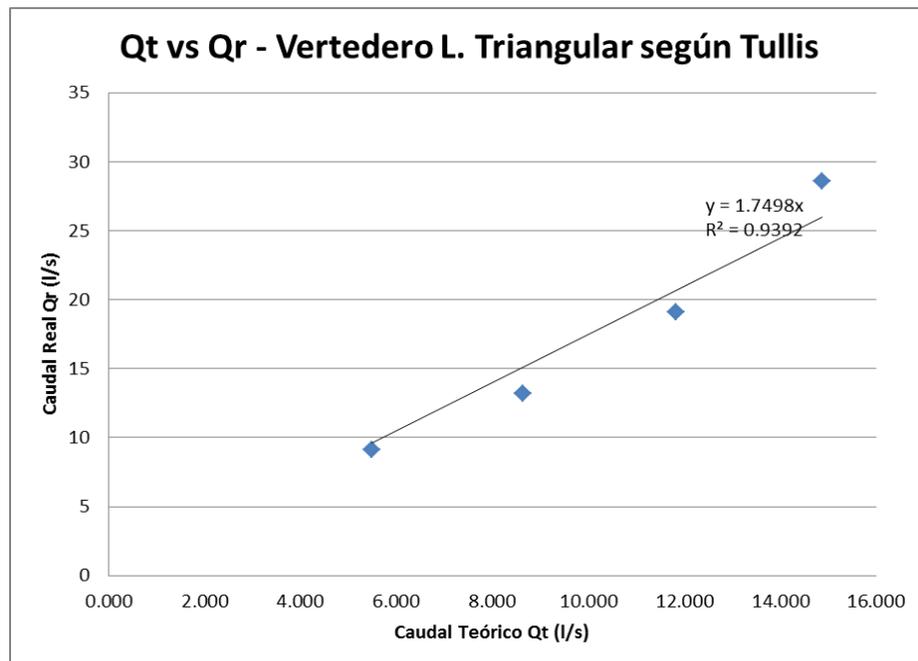
x = Caudal teórico Q_t (l/s)

Tabla 5.9: Caudales teóricos y caudales reales, estimación de error

Tipo de vertedero Laberinto	Qt	Qr	Error
Triangular	5.483	9.104	40%
	8.652	13.201	34%
	11.840	19.141	38%
	14.870	28.581	48%
Trapezoidal	3.633	9.104	60%
	5.610	13.201	58%
	7.670	19.141	60%
	9.347	28.581	67%

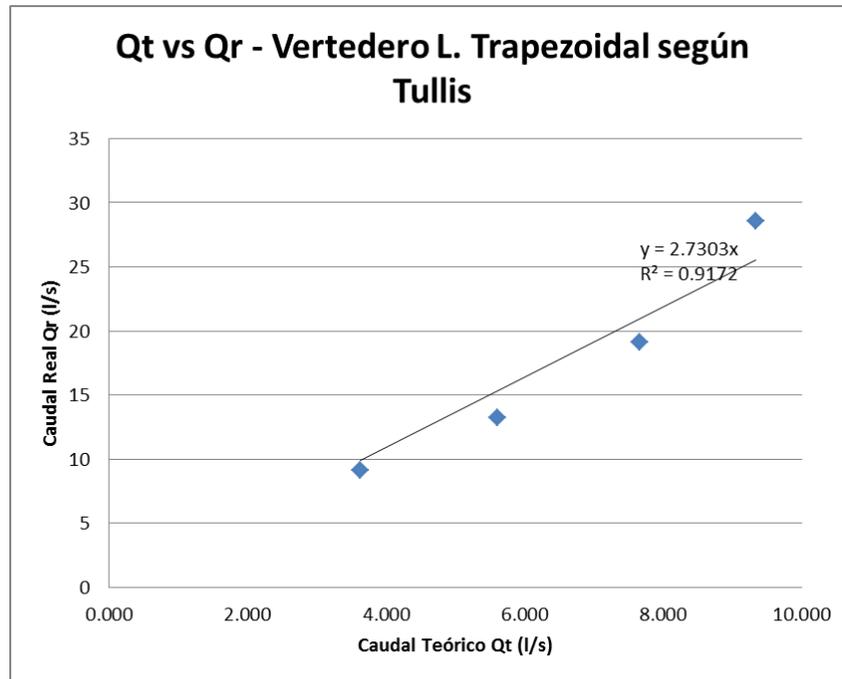
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5.10: Comparación lineal de los caudales teóricos y caudales reales



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.11: Comparación lineal de los caudales teóricos y caudales reales



Fuente: Elaboración propia

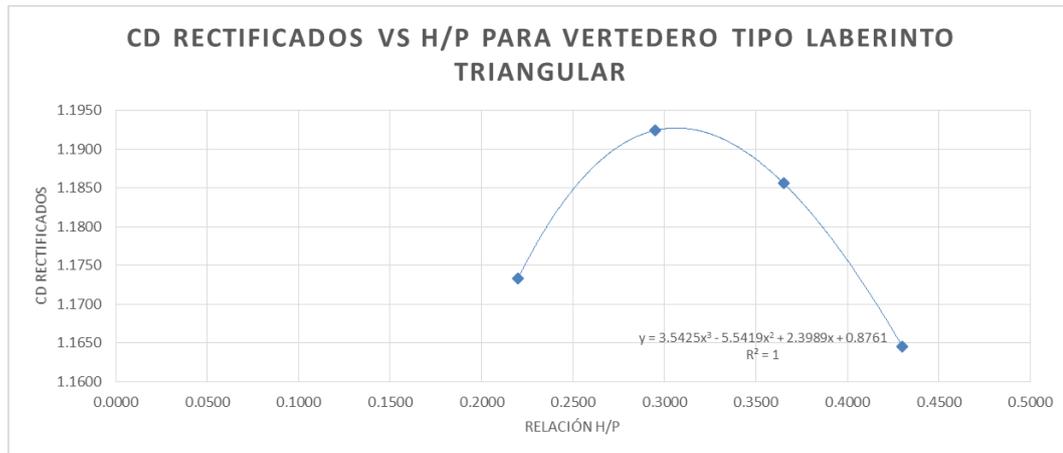
Con el factor de calibración se generan las fórmulas calibradas del coeficiente de descarga según Tullis, Amanian y Waldron (1995), con las cuales se calcula el valor del caudal teórico rectificado, para hacer la comparación con el caudal real y estimar su error.

Tabla 5.10: Coeficientes de descarga rectificados según el tipo de vertedero ensayado

Tipo de vertedero	Cd	Cd rectificado
laberinto		
Triangular	0.6706	1.1734
	0.6815	1.1925
	0.6776	1.1857
	0.6656	1.1646
Trapezoidal	0.5647	1.5419
	0.5498	1.5011
	0.5224	1.4264
	0.4938	1.3482

Fuente: Elaboración propia

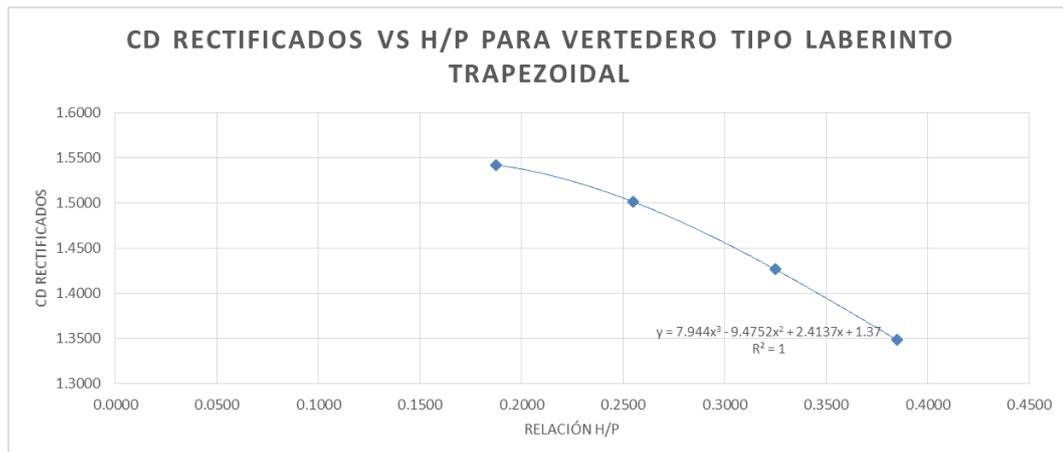
a. **Fórmula rectificada para vertedero laberinto tipo triangular, según Tullis, Amanian y Waldron (1995):**



$$Cd = 0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P}\right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P}\right)^3$$

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P}\right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P}\right)^3\right) * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

b. **Fórmula rectificada para vertedero laberinto tipo trapezoidal, según Tullis, Amanian y Waldron (1995):**



$$Cd = 1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P}\right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P}\right)^3$$

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P}\right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P}\right)^3\right) * L * \sqrt{2g} * H^{\frac{3}{2}}$$

Tabla 5.11: Caudales rectificados y caudales reales, con su estimación de error

Tipo de vertedero	Qt	Qr	Error	Qt rectificado	Qr	Error
Laberinto						
Triangular	5.483	9.104	40%	9.594	9.104	5%
	8.652	13.201	34%	15.139	13.201	15%
	11.840	19.141	38%	20.717	19.141	8%
	14.870	28.581	48%	26.020	28.581	9%
Trapezoidal	3.633	9.104	60%	9.919	9.104	9%
	5.610	13.201	58%	15.316	13.201	16%
	7.670	19.141	60%	20.940	19.141	9%
	9.347	28.581	67%	25.519	28.581	11%

Fuente: Elaboración propia

5.2. CÁLCULO Y DEMOSTRACIÓN DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

5.2.1. CÁLCULOS PARA DETERMINACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO

5.2.1.1. VERTEDERO TIPO RECTANGULAR

En el caso del vertedero tipo rectangular sin contracciones laterales, se pudo observar un comportamiento de flujo constante aguas abajo, las velocidades y tirantes no se alteraron en todo el recorrido del agua. Por lo tanto, no cumple con los requerimientos descritos para determinarse un resalto hidráulico.

5.2.1.2. VERTEDEROS TIPO LABERINTO

Se aplicaron las condiciones descritas en los puntos **2.2.3 y 2.2.8.2:**

- CÁLCULO DE NÚMERO DE FROUDE:

En la tabla 5.12. se resalta los casos que cumplen las condiciones mencionadas en el punto 2.2.3., además se determina el tipo de resalto hidráulico.

El resto de casos no concluyen en la formación de resalto hidráulico, por lo tanto no disipan energía y quedaron descartados de futuros cálculos.

- RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES RECTANGULARES

Se validaron los cálculos de número de froude y se hizo un tamizado de los resultados.

A continuación se muestra una tabla con resultados que satisfacen la ecuación y se estima el error:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} \right) - 1 \right)$$

Donde: $A = \frac{y_2}{y_1}$

$$B = \frac{1}{2} \left(\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} \right) - 1 \right)$$

Tabla 5.13: Validación de resalto hidráulico.

Tipo de vertedero laberinto	Q (l/s)	A		B	Error	A		B	Error
		Pendiente 0%				Pendiente 1%			
Triangular	9.104	3.211	3.124	3%	4.800	5.013	4%		
	13.201	6.000	5.958	1%	5.667	5.941	5%		
	19.141	8.800	9.082	3%	8.000	8.345	4%		
Trapezoidal	9.104	3.733	3.593	4%	6.286	6.507	3%		
	13.201	5.727	5.962	4%	6.625	6.891	4%		
	19.141	9.222	8.723	6%	9.571	10.043	5%		
Rectangular	9.104	4.000	4.191	5%					
	13.201	7.800	8.173	5%					
Circular	9.104	4.583	4.326	6%					
	13.201	6.286	6.471	3%					

Fuente: Elaboración propia

- CÁLCULO DE DIFERENCIA DE ENERGÍAS EN RESALTO HIDRÁULICO

Se calcularon las energías en los tirantes Y_1 y Y_2 del resalto hidráulico, se compararon ambas energías y se determinó el porcentaje de disipación.

Los resultados de la tabla 5.14. concluyeron existencia de disipación de energía con todos los vertederos laberinto en flujos que recorren un canal horizontal (pendiente 0%). Cuando el canal se inclina a pendiente de 1%, los vertederos que funcionan como disipadores de energía son los vertederos laberinto triangular y trapezoidal. Para pendientes mayores de 1%, ningún vertedero tipo laberinto generó resalto hidráulico, por lo tanto no se generó disipación de energía.

Tabla 5.14: Energías producidas en tirantes y disipación.

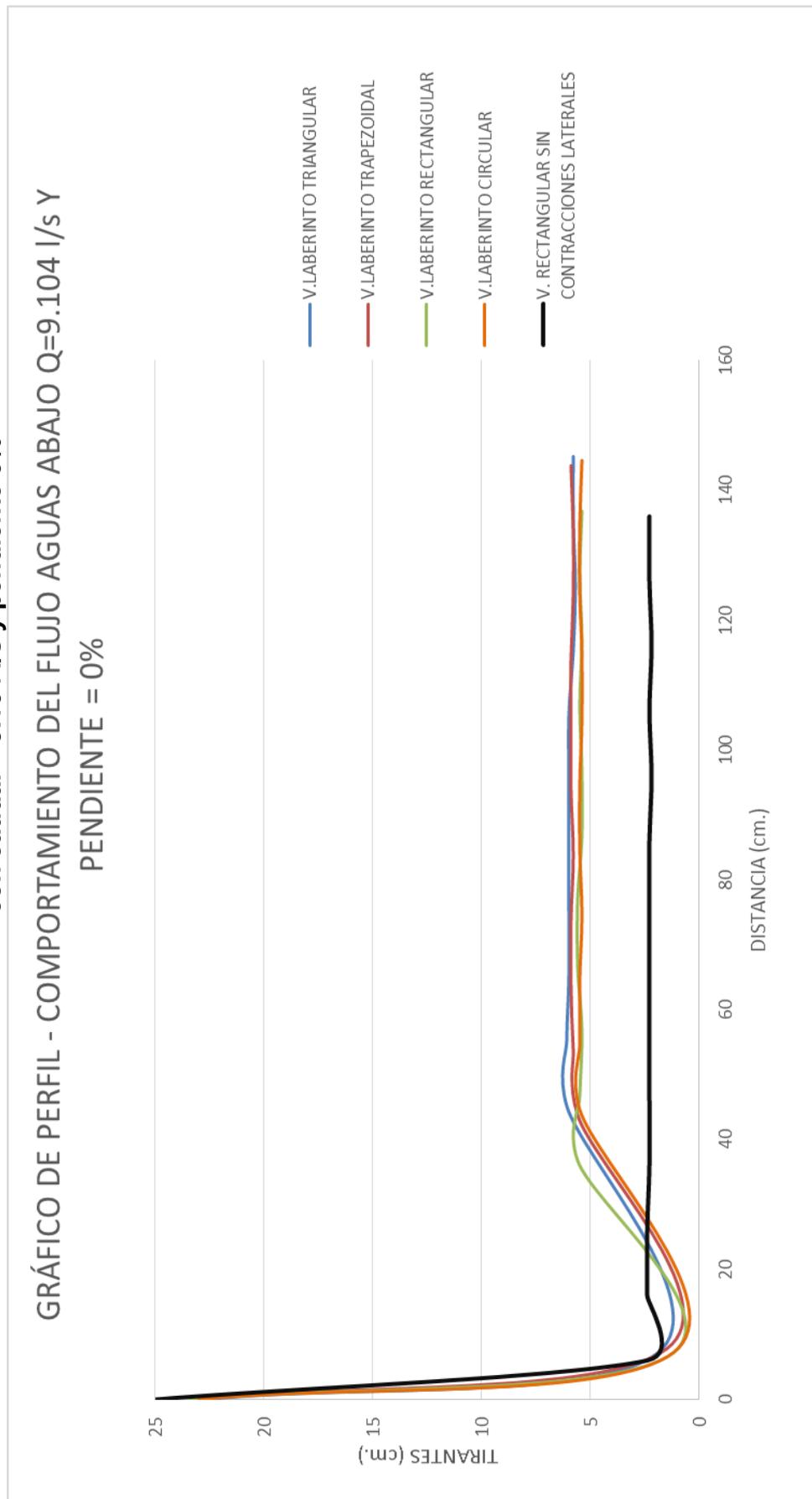
Tipo de vertedero laberinto	Q (l/s)	Pendientes							
		0%				1%			
		E1	E2	ΔE	Porcentaje de disipación (%)	E1	E2	ΔE	Porcentaje de disipación (%)
TRIANGULAR	9.104	0.0749	0.0677	-0.0049	10%	0.0720	0.0615	-0.0053	15%
	13.201	0.0916	0.0815	-0.0075	11%	0.0778	0.0677	-0.0064	13%
	19.141	0.1180	0.1032	-0.0113	13%	0.0904	0.0787	-0.0117	13%
TRAPEZOIDAL	9.104	0.0712	0.0635	-0.0077	11%	0.0730	0.0645	-0.0085	12%
	13.201	0.0873	0.0766	-0.0070	12%	0.0825	0.0717	-0.0051	13%
	19.141	0.1076	0.0965	-0.0041	10%	0.1065	0.0934	-0.0083	12%
RECTANGULAR	9.104	0.0763	0.0699	-0.0064	8%				
	13.201	0.0741	0.0679	-0.0106	8%				
CIRCULAR	9.104	0.0714	0.0653	-0.0061	8%				
	13.201	0.0727	0.0683	-0.0044	6%				

Fuente: Elaboración propia

- PERFILES DE FLUJO

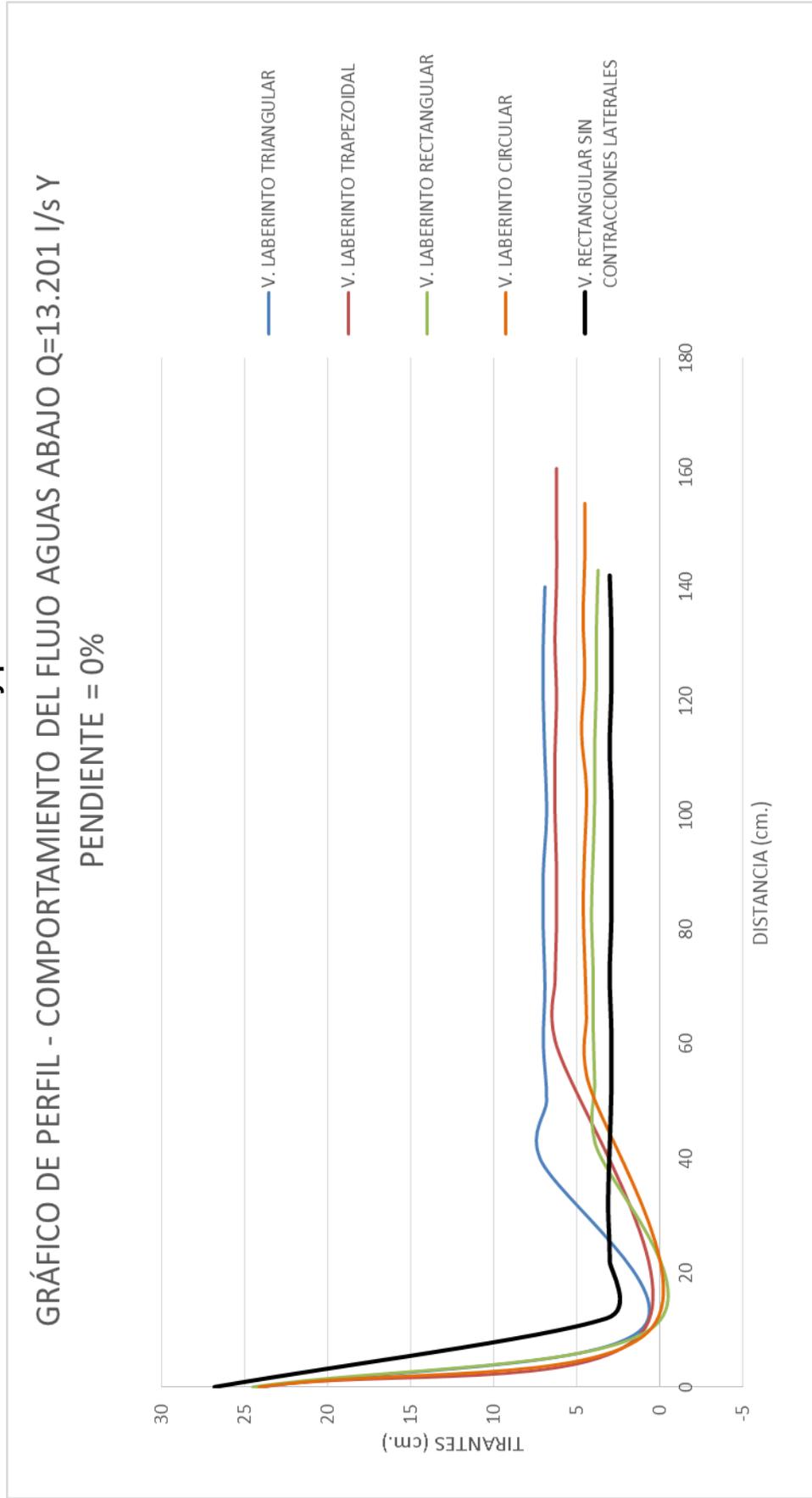
A continuación se mostrarán gráficas comparativas de perfiles del comportamiento del flujo en los ensayos realizados.

Gráfica 5.12: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 9.104 l/s y pendiente 0%



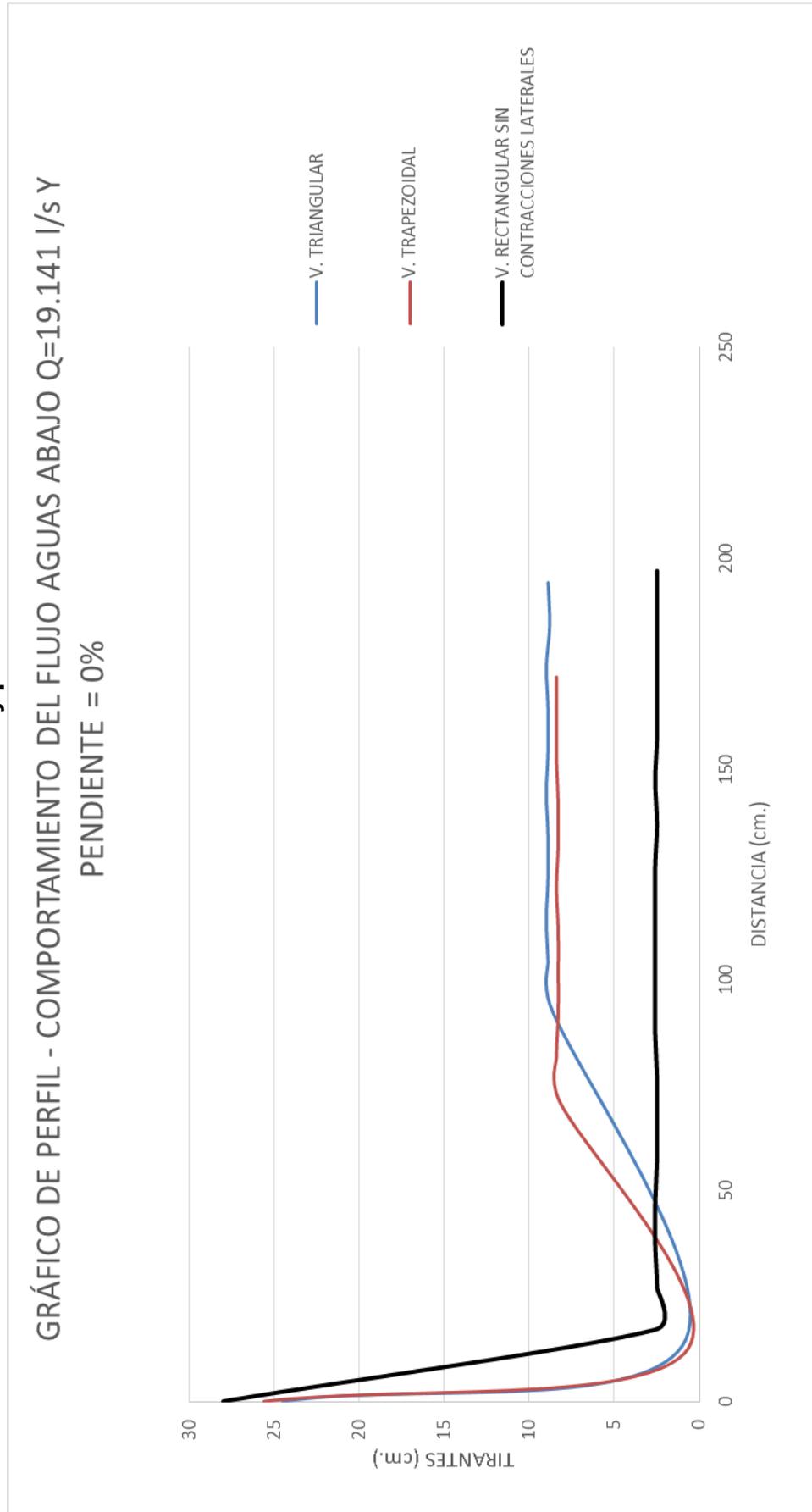
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.13: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 13.201 l/s y pendiente 0%



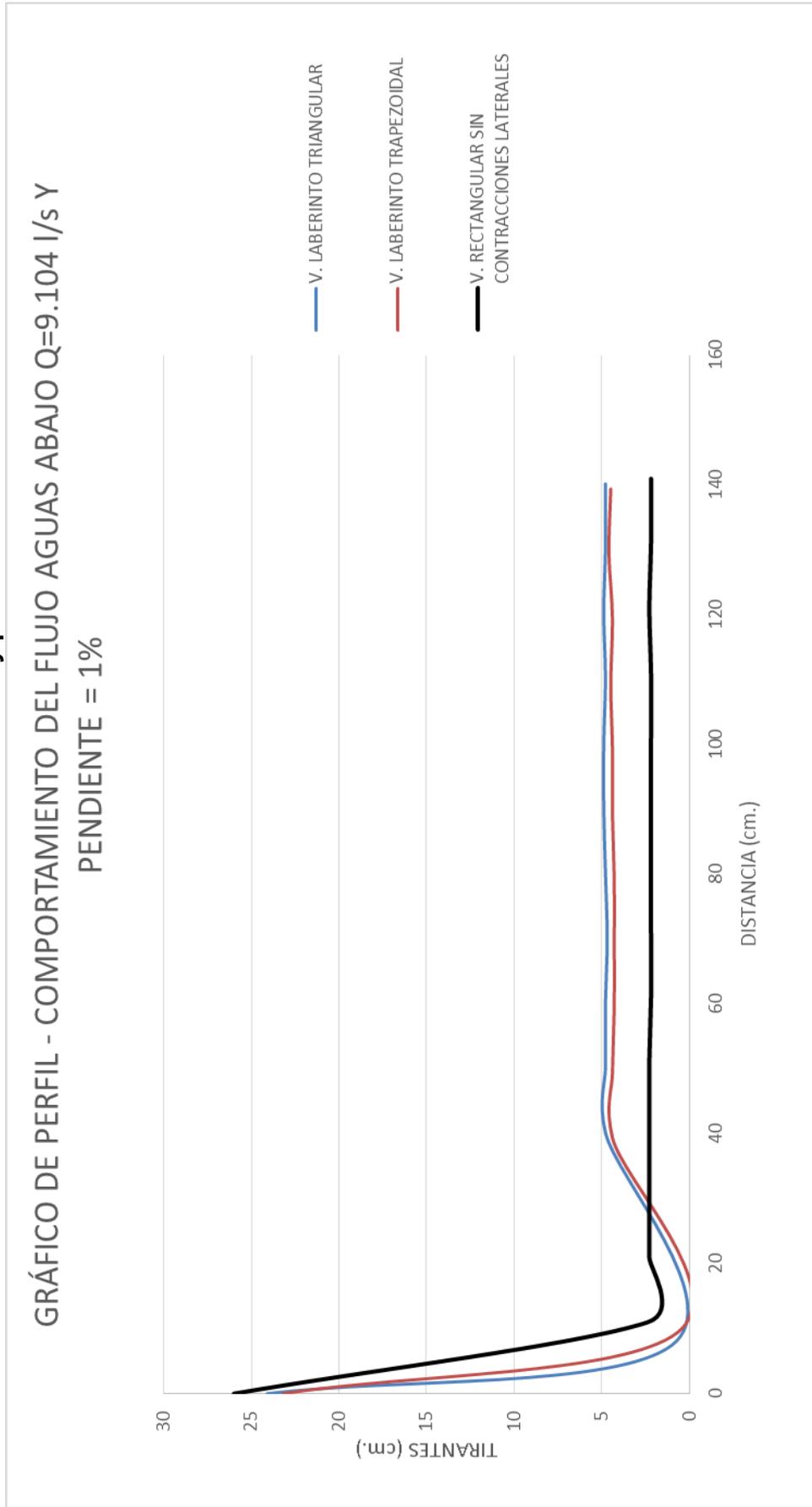
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.14: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 19.141 l/s y pendiente 0%



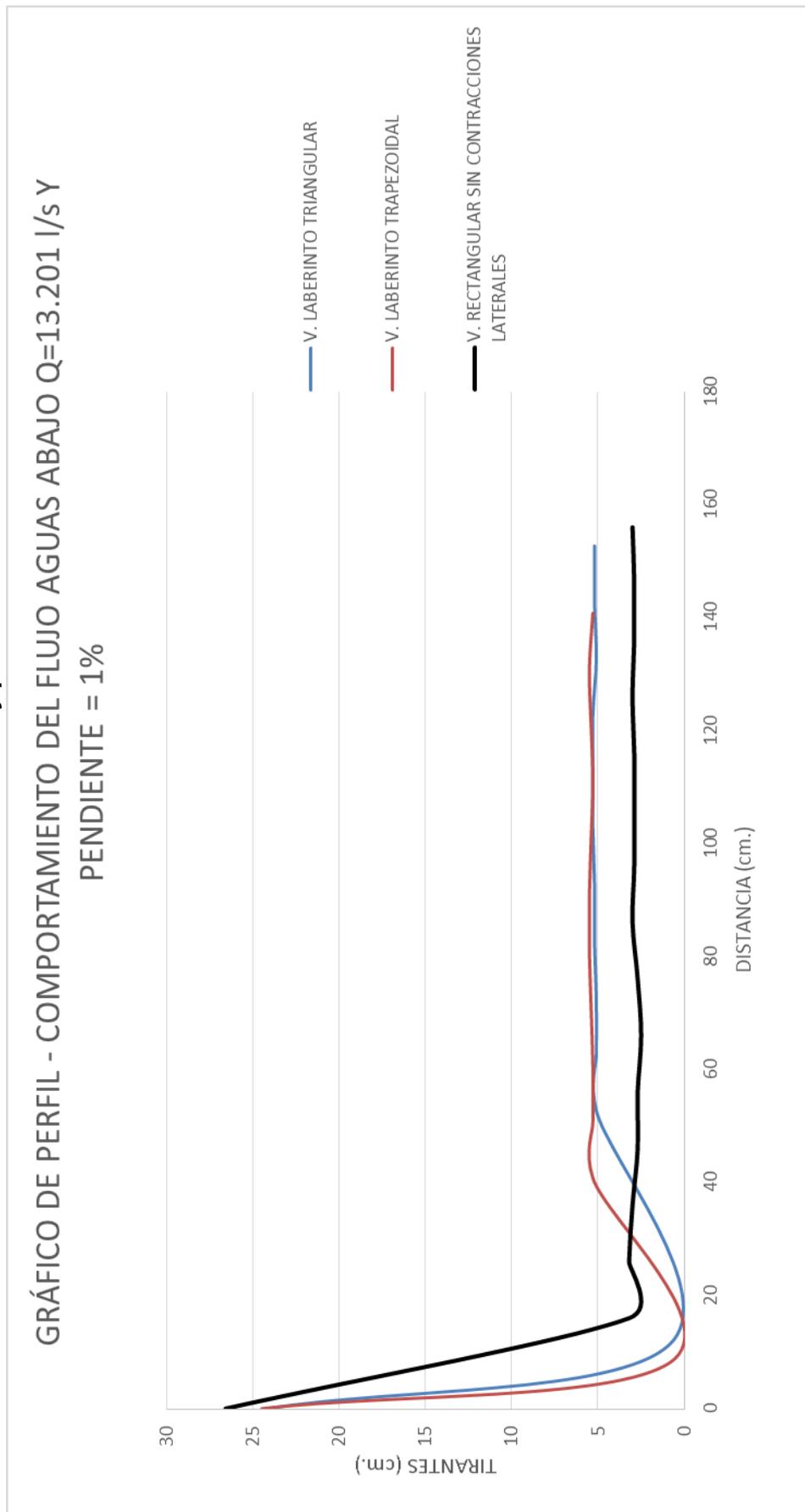
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.15: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 9.104 l/s y pendiente 1%



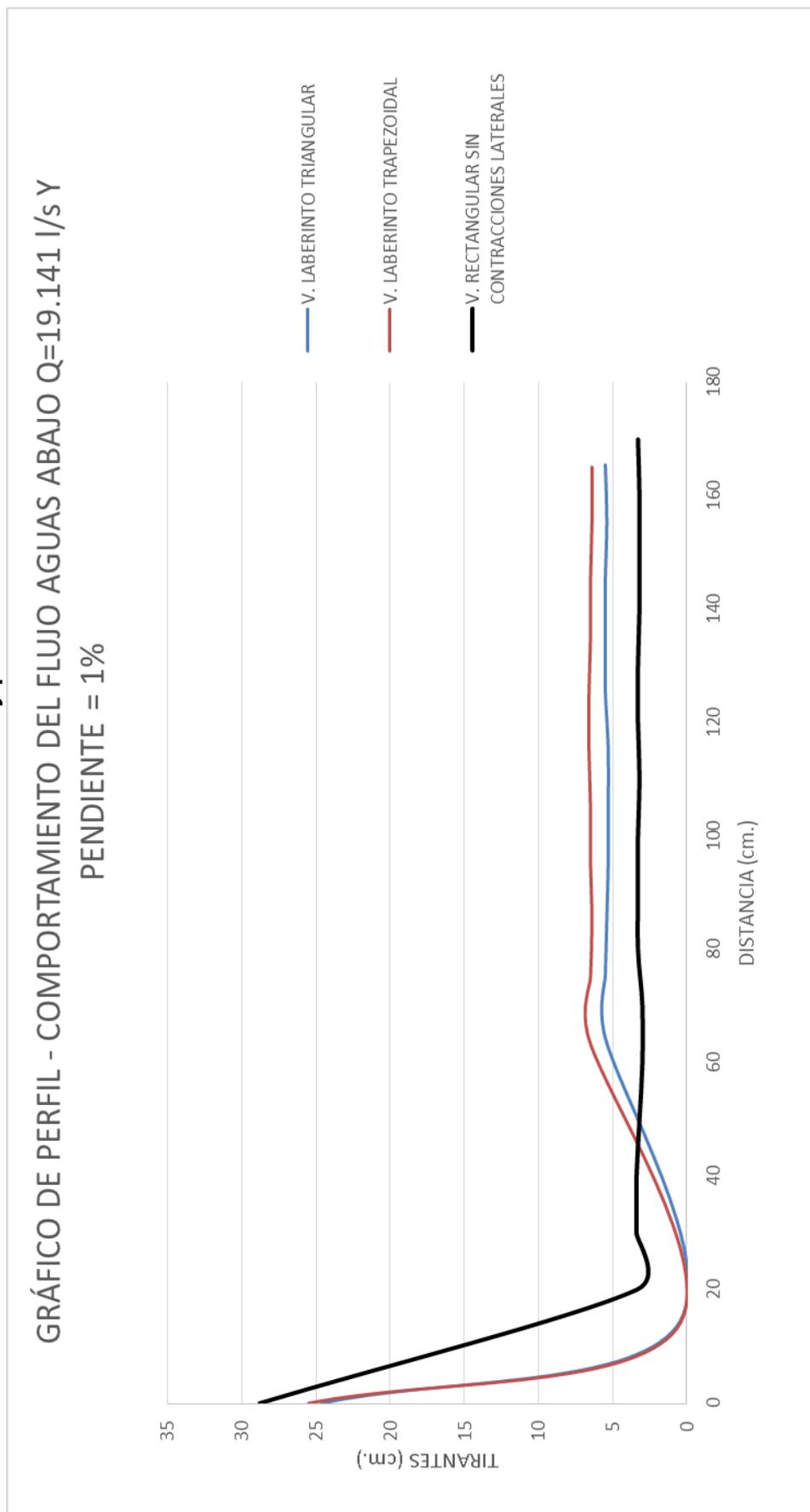
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.16: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 13.201 l/s y pendiente 1%



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5.17: Comparación de los comportamientos de los flujos con caudal = 19.141 l/s y pendiente 1%



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Los dos criterios usados para el diseño de los vertederos tipo laberinto fueron los ángulos de apertura y el ancho del canal. A partir de esos criterios, el resto de características se calcularon mediante fórmulas para el diseño de este tipo de vertederos.

2. Se logró diseñar y construir los prototipos de los vertederos tipo laberinto de forma correcta. El material usado no presentó daños de corrosión ni deterioro durante y después de los ensayos.

3. Se realizó el cálculo de coeficientes de descarga de los cuatro vertederos laberinto mediante la fórmula caudal – teórico y la fórmula propuesta por Tullis, Amanian y Waldron (1995) :

Fórmula caudal – teórico:

- | | | |
|----|----------------------------------|-------------------|
| a. | Vertedero laberinto triangular: | Cd= 1.1768 |
| b. | Vertedero laberinto trapezoidal: | Cd= 1.4114 |
| c. | Vertedero laberinto rectangular: | Cd= 1.4467 |
| d. | Vertedero laberinto circular: | Cd= 1.5636 |

Fórmula propuesta por Tullis, Amanian y Waldron (1995):

- a. Vertedero laberinto triangular:

$$Cd = 0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P}\right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P}\right)^3$$

- b. Vertedero laberinto trapezoidal:

$$Cd = 1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P}\right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P}\right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P}\right)^3$$

4. Mediante el cálculo de coeficientes de descarga se desarrollaron las fórmulas de calibración de caudales para la fórmula general para vertederos, fórmula caudal – teórica y fórmula propuesta por Tullis, Amanian y Waldron (1995):

Fórmula general:

- a. Vertedero laberinto triangular:

$$Q = 0.7191H^{1.6783}$$

- b. Vertedero laberinto trapezoidal:

$$Q = 1.1110H^{1.5549}$$

- c. Vertedero laberinto rectangular:

$$Q = 1.0824H^{1.5802}$$

- d. Vertedero laberinto circular:

$$Q = 1.1959H^{1.5694}$$

Fórmula caudal - teórica:

- a. Vertedero Laberinto Triangular

$$Ql = 0.7845 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

- b. Vertedero Laberinto Trapezoidal

$$Ql = 0.9409 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

- c. Vertedero Laberinto Rectangular

$$Ql = 0.9645 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

- d. Vertedero Laberinto Circular

$$Ql = 1.0424 * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

Fórmula propuesta por Tullis, Amanian y Waldron (1995):

a. Vertedero Laberinto tipo triangular:

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(0.8761 + 2.3989 * \left(\frac{H}{P} \right) - 5.5419 * \left(\frac{H}{P} \right)^2 + 3.5425 * \left(\frac{H}{P} \right)^3 \right) * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

b. Vertedero Laberinto tipo trapezoidal:

$$Ql = \frac{2}{3} * \left(1.37 + 2.4137 * \left(\frac{H}{P} \right) - 9.4752 * \left(\frac{H}{P} \right)^2 + 7.9440 * \left(\frac{H}{P} \right)^3 \right) * L * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

5. Se realizó el estudio de disipación de energía de cuatro vertederos tipo laberinto: triangular, trapezoidal, rectangular y circular, y un vertedero rectangular convencional sin contracciones laterales. Se obtuvo como resultado la **disipación de energía** mediante **resalto hidráulico** de los vertederos laberinto triangular y trapezoidal ensayados con caudales de **9.104 l/s, 13.201 l/s y 19.141 l/s**, con pendientes de **0% y 1%**; y de los vertederos rectangular y circular ensayados con caudales de **9.104 l/s y 13.201 l/s** con pendiente de **0%**. El vertedero rectangular convencional sin contracciones laterales no disipó energía bajo ninguna condición, no se observó resalto hidráulico.

6. El porcentaje de disipación de energía para el vertedero laberinto tipo triangular promedia 11.33% para los caudales ensayados y con pendiente de 0%. Y promedia 13.67% para pendiente de 1%.

7. El porcentaje de disipación de energía para el vertedero laberinto tipo trapezoidal promedia 11.00% para los caudales ensayados y con pendiente de 0%. Y promedia 12.33% para pendiente de 1%.

8. El porcentaje de disipación de energía para el vertedero laberinto tipo rectangular promedia 8.00% para los caudales ensayados y con pendiente de 0%.

9. El porcentaje de disipación de energía para el vertedero laberinto tipo circular promedia 7.00% para los caudales ensayados y con pendiente de 0%.

10. Los vertederos laberinto triangular y trapezoidal no disiparon energía cuando fueron ensayados con caudales de 28.581 l/s y con pendiente de 2%.

11. Los vertederos laberinto rectangular y circular no disiparon energía cuando fueron ensayados con caudales de 19.141 l/s y 28.581 l/s, y con pendientes de 1% y 2%.

12. Los vertedero laberinto tipo triangular y trapezoidal fueron los que generaron mayor disipación de energía, en comparación a los rectangulares y circulares, cuando fueron ensayados a pendiente 0%. Además fueron los únicos que cumplieron el propósito cuando fueron ensayados a pendiente de 1%.

RECOMENDACIONES

1. Continuar la investigación de disipación de energía con vertederos tipo laberinto de diferente forma de cresta y comparar los resultados obtenidos.
2. Realizar los mismos ensayos con vertederos tipo laberinto de diferentes características en umbral y ángulos de apertura.
3. Realizar nuevos ensayos colocando los vertederos laberinto rectangular y circular en distintos tramos del canal de pendiente variable para obtener un mayor recorrido del flujo, y así, una mejor visualización de su comportamiento.
4. Tener un tiempo de espera de 30 segundos para la toma de datos, este es un tiempo apropiado para la estabilización del flujo.
5. Evitar el filtrado excesivo del flujo por los bordes laterales de los vertederos tipo laberinto mediante el uso de cintas auto-adhesivas.

BIBLIOGRAFIA

- Rodriguez Ramirez, Maria Asucena (2015). Metodología para el Diseño Hidráulico de Vertedores de Laberinto. Tesis de grado. México DF.
- Medina Acosta, Lourdes y Soriano Sifontes, Geraldine (1992). Comportamiento Hidráulico del Aliviadero del Proyecto Yacambù. Tesis de grado. Venezuela.
- Dr. Evio Alegret Breña y Dr. Rafael Pardo Gómez (2005). Diseño hidráulico de aliviaderos para presas pequeñas, Investigación en el Centro de Investigaciones Hidráulicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Humbert Chanson. Mc Graw -Hill. Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos.
- Paschoal Silvestre. Fundamentos de Hidráulica General. LIMUSA.
- Comisión Federal de Electricidad. Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección Hidráulica.
- Plan Nacional de Obras Hidráulicas para el Desarrollo Rural. Presas de Derivación. Antigua Secretaria de Recursos Hidráulicos.
- Ronald V. Giles. Serie Schaum Mc Graw – Hill. Antigua Secretaria de Recursos Hidráulicos. Instrucciones Generales para la Localización y Diseño de Canales y sus Estructuras. Mecánica de los Fluidos E Hidráulica.
- Ven Te Chow (1994), Hidráulica de Canales.

- Arturo Rocha Felices (2002), Hidráulica de Tuberías y Canales.
- Máximo Villon Béjar (2008), Hidráulica de Canales.
- Ing. Hernán Pedro Martínez Ramos (2011), Evaluación experimental de los coeficientes de gasto utilizados en fórmulas de vertederos en diferentes condiciones de operación. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sigüenza Corcuera Heiner Mijael (2017), Análisis de problemas hidráulicos, tipos de flujo y estructuras de aforo mediante la construcción de seis equipos experimentales en el canal de pendiente variable – UPAO. Tesis de grado. Universidad Privada Antenor Orrego.
- J. Paul Tullis, Nosratollah Amanian y David Waldron (1995), Design of Labyrinth Spillways.
- Taylor, G. (1969). The performance of labyrinth weirs. PhD Thesis, University of England.
- Waldron, D. (1994). Design of labyrinth spillway. M.S. Thesis, Utah State University.
- Crookston, B.M. & Tullis, B.P. (2013a). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. Part 1: Discharge relationships.

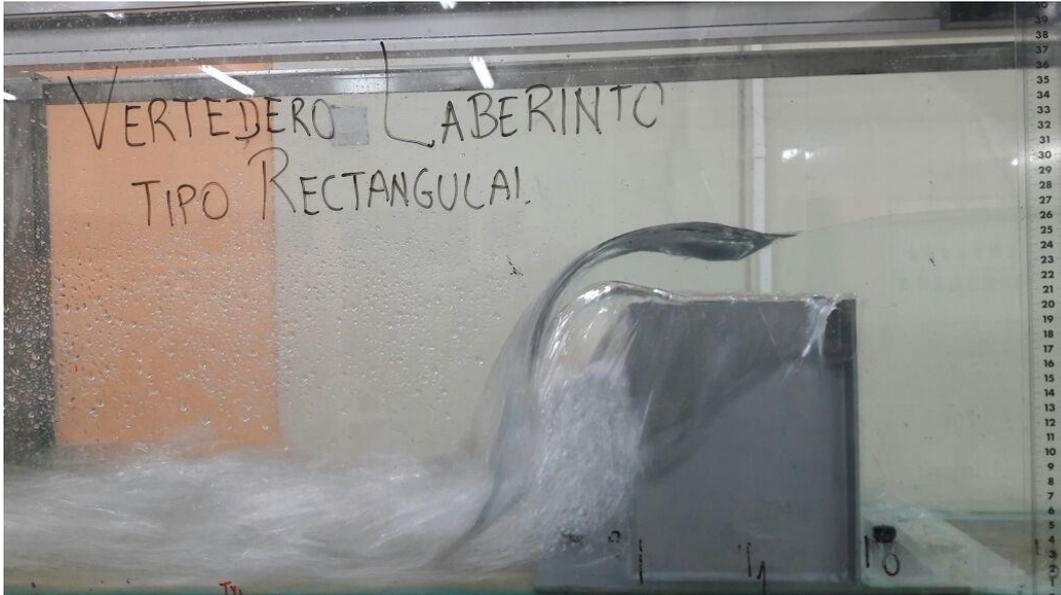
ANEXOS



FOTOGRAFÍA Nº 01: PERFIL DE CANAL PENDIENTE VARIABLE PARA TOMA DE DATOS.



FOTOGRAFÍA Nº 02: MEDICIÓN DE VELOCIDADES CON EQUIPO DIGITAL DEL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE.



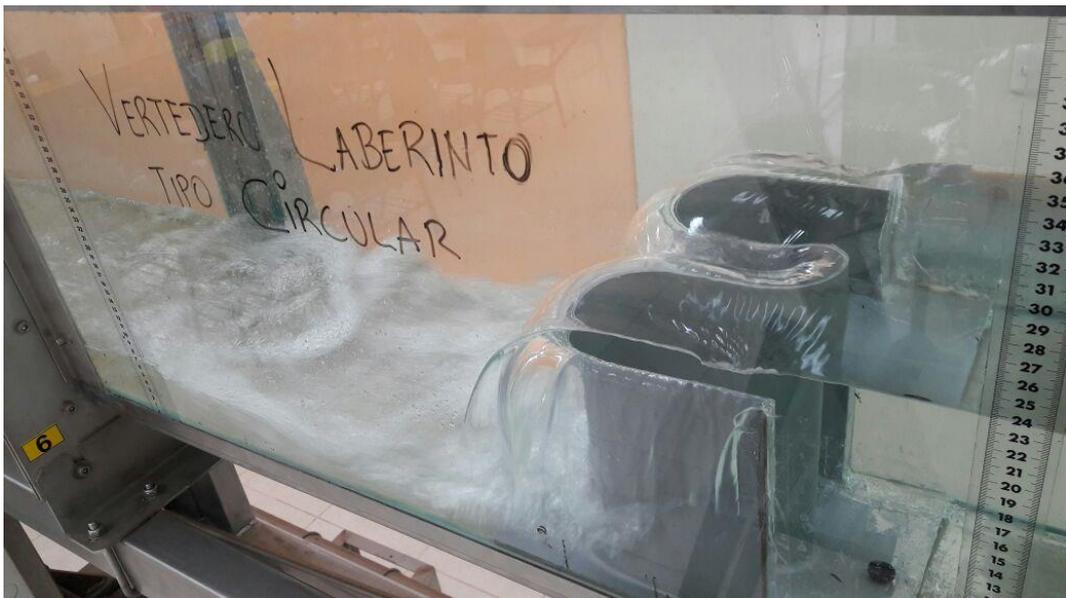
FOTOGRAFÍA N° 03: FORMACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO EN VERTEDERO LABERINTO RECTANGULAR.



FOTOGRAFÍA N° 04: FORMACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO EN VERTEDERO LABERINTO TRIANGULAR.



FOTOGRAFÍA N° 05: COMPORTAMIENTO DEL FLUJO AGUAS ABAJO CON VERTEDERO RECTANGULAR SIN CONTRACCIONES LATERALES.



FOTOGRAFÍA N° 06: FORMACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO EN VERTEDERO LABERINTO CIRCULAR.



FOTOGRAFÍA Nº 07: COMPORTAMIENTO DE FLUJO EN VERTEDERO TIPO LABERINTO RECTANGULAR CON PENDIENTE 2%.



FOTOGRAFÍA N° 08: FORMACIÓN DE RESALTO HIDRÁULICO EN VERTEDERO LABERINTO TRAPEZOIDAL.

PROTOTIPOS DE VERTEDEROS TIPO LABERINTO EN PLANTA Y ELEVACIÓN

