UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE, APLICANDO MODELACIÓN CFD

Tesis para optar el título profesional de

INGENIERO CIVIL

JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN

Pucallpa, Perú

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 034-2026

GRADUANDO : **Bach. ARÉVALO CERRÓN JOSÉ GUILLERMO**

TEMA : **"DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE, APLICANDO MODELACIÓN CFD".**

ASESOR : **Dr.DONAYRE HERNANDEZ DEVYN OMAR**

CRITERIOS	PUNTAJE			
	3	2	1	0
I- PRESENTACIÓN				
* MOTIVACIÓN	X			
* TONO DE VOZ		X		
* CALIDAD DE MATERIAL AUDIOVISUAL		X		
II- DESARROLLO DE CONTENIDO				
* SECUENCIA		X		
* DOMINIO DE VOZ		X		
* USO ADECUADO DEL MATERIAL		X		
* VALIDEZ DE LOS HALLAZGOS		X		
III- ABSOLUCIÓN DE PREGUNTAS				
* RESPONDE A LAS PREGUNTAS FORMULADAS POR EL JURADO	X			
IV- APORTE CIENTIFICO Y TECNOLOGICO				
* AL DESARROLLO DE LA COMUNIDAD		X		
* A LA PROFESIÓN	X			

EVALUACIÓN

- EXCELENCIA 26 A 30 PUNTOS
- UNANIMIDAD 21 A 25 PUNTOS
- MAYORIA 16 A 20 PUNTOS
- DESAPROBADO 15 A MENOS

CALIFICACIÓN FINAL :
PUNTAJE : 23 / 30

CONCLUSIONES:
APROBADO POR : UNANIMIDAD
DESAPROBADO POR :

JURADO EVALUADOR

Dr.GONZALEZ MANRIQUE DE LARA, DAVID ABEL
PRESIDENTE

Dr.ROMAN CLAROS, WALTER GILBERTO
PRIMER MIEMBRO

Mg.MERCADO ROJAS, MIJAEL GABRIEL
SEGUNDO MIEMBRO

Dra. RIOS HIDALGO DE CERNA, CLOTILDE
SECRETARIA ACADÉMICA

PUCALLPA, 24 DE AGOSTO DEL 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
Carretera Federico Basadre Km 6200 - Pucallpa - Ucayali

ACTA DE APROBACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

En la Ciudad Universitaria, a los 19 días del mes de MAYO del 2026. Los miembros del Jurado declaran APROBADO POR UNANIMIDAD el PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE TESIS titulado:

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE GASTO EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE, APLICANDO MODELACION CFD.

Presentado por el Bachiller:

JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN

De la Escuela Profesional de:

INGENIERÍA CIVIL

Siendo el Jurado Dictaminador, conformado por:

Presidente	: DR. DAVID ABEL GONZALEZ MANRIQUE DE LARA
Primer Miembro	: DR. WALTER GILBERTO ROMAN CLAROS
Segundo Miembro	: MG. MIJAEL GABRIEL MERCADO ROJAS
Asesor	: DR. DEVYN OMAR DONAYRE HERNÁNDEZ

Para dar fe de este proceso, se le asigna la presente acta y a partir de la presente fecha queda expedito para continuar con los trámites de sustentación de la TESIS.

Pucallpa, 19 de enero de 2026

Dr. DAVID ABEL GONZALEZ MANRIQUE DE LARA
PRESIDENTE

Dr. WALTER GILBERTO ROMAN CLAROS
MIEMBRO

Mg. MIJAEL GABRIEL MERCADO ROJAS
MIEMBRO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TESIS

Nº **V/013-2026**.

La Dirección de Producción Intelectual de la Universidad Nacional de Ucayali, hace constar por la presente, que la Tesis titulada:

"**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE, APLICANDO MODELACIÓN CFD**"

Autor(es)	:	**ARÉVALO CERRÓN, JOSÉ GUILLERMO**
Facultad	:	**INGENIERÍA DE SISTEMAS E INGENIERÍA CIVIL**
Escuela	:	**ING. CIVIL**
Asesor(a)	:	**Dr. DONAYRE HERNANDEZ, DEVYN OMAR**

Presenta un **porcentaje de similitud de 5%,** verificado en el Sistema Antiplagio COMPILATIO,

De acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO, el cual indica: "todo trabajo de investigación no debe superar el 10%". **En tal sentido, se declara, que la TESIS presenta un porcentaje aceptable de similitud,** procediéndose a emitir la presente Constancia a solicitud del asesor.

En señal de conformidad se firma y sella el presente documento.

Fecha: 15/01/2026

Dr. JOSÉ MANUEL CÁRDENAS BERNAOLA
Director de Producción Intelectual

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Repositorio de la Universidad Nacional de Ucayali

Yo, José Guillermo Arévalo Cerrón

Autor de la tesis titulada : Determinación Del Coeficiente de Gasto en Vertederos de Pared Delgada, Tipo Trapezoidal y Semicircular en Canal Rectangular de Pendiente Variable, Aplicando Modelación CFD

Sustentada el año 2026

Asesor(a): Devyn Omar Donayre Hernández

Facultad: Facultad de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Civil

Escuela Profesional: Ingeniería Civil

Autorizo la publicación:

PARCIAL ☐ TOTAL ☒

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes términos:

Primero: Otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en formato digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: Declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali, la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria y el Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 19 / 10 / 2026

Email: jose.guimo.ac@gmail.com Firma:

Teléfono: 945090627 DNI: 72546890

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, Claudia y Víctor, por estar siempre apoyándome para llegar a esta hermosa etapa, donde todo joven en su formación profesional anhela llegar.

A mis abuelos, porque me tuvieron fe en cada paso que daba y porque me aconsejaron.

También dedicárselos a toda mi familia, porque cada uno de ellos, con sus palabras de superación, aportó para lograr llegar a este momento muy importante.

José Guillermo

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis, en especial a los docentes de la escuela profesional de ingeniería civil, a nuestros compañeros y amigos que colaboraron con la realización de este trabajo.

RESUMEN

La investigación tuvo el objetivo de determinar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada trapezoidal y semicircular en un canal de ensayo rectangular de pendiente variable (1%, 1.5% y 2%), utilizando herramientas de simulación computacional de fluidos (CFD) para evaluar el comportamiento en un modelo hidráulico. La investigación fue aplicada, con un diseño experimental de laboratorio, se realizó un total de 72 ensayos experimentales en un canal de ensayo rectangular de 86x300mm en el Laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali, para la simulación se utilizó la versión educativa del software Ansys Student 2025 R2 por Ansys Inc., con un tipo de malla tetraédrica. El estudio reveló resultados válidos para un rango de cargas 0.02<h<0.07, el coeficiente de gasto promedio Cd obtenido de un rango de caudales de 0.5 a 6 m3/h, para el vertedero trapezoidal con una pendiente de 1% fue de 0.6324, con una pendiente de 1.5% fue de 0.6291, y con una pendiente de 2% fue de 0.6473; el Cd para el vertedero semicircular con una pendiente de 1% fue de 1.0825, con una pendiente de 1.5% fue de 1.1322 y con una pendiente de 2% fue de 1.1820, y la prueba de ajuste de bondad de datos con el modelo potencial. Se concluye que la modelación CFD fue determinante para validar experimental y computacionalmente estos valores de coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

Palabras clave: Coeficiente de gasto, vertedero de pared delgada, canal de ensayo.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the discharge coefficients of trapezoidal and semicircular thin-walled weirs in a rectangular test channel with variable slopes (1%, 1.5%, and 2%), using computational fluid dynamics (CFD) simulation tools to evaluate their behavior in a hydraulic model. The research was applied, with a laboratory experimental design. A total of 72 experimental tests were conducted in an 86x300mm rectangular test channel in the Structures and Hydraulics Laboratory of the Faculty of Systems Engineering and Civil Engineering at the National University of Ucayali. The educational version of Ansys Student 2025 R2 by Ansys Inc. software was used for the simulation, with a tetrahedral mesh. The study revealed valid results for a head range of $0.02 < h < 0.07$. The average discharge coefficient (Cd) obtained from a flow range of 0.5 to 6 m^3/h for the trapezoidal weir was 0.6324 with a 1% slope, 0.6291 with a 1.5% slope, and 0.6473 with a 2% slope. For the semicircular weir, the Cd was 1.0825 with a 1% slope, 1.1322 with a 1.5% slope, and 1.1820 with a 2% slope. The goodness-of-fit test for the data with the power model concluded that CFD modeling was crucial for experimentally and computationally validating these discharge coefficient values for trapezoidal and semicircular thin-walled weirs.

Keywords: Expenditure coefficients, thin-walled weir, test channel.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA..... vi

AGRADECIMIENTO..... vii

RESUMEN viii

ABSTRACT ix

ÍNDICE GENERAL x

ÍNDICE DE TABLAS xii

ÍNDICE DE FIGURAS xvi

INTRODUCCIÓN xxii

CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 23

1.1. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA 23

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 25

1.2.1. PROBLEMA GENERAL 25

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS 25

1.3. OBJETIVOS 25

1.3.1. OBJETIVO GENERAL 25

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 25

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 26

1.5. LIMITACIONES Y ALCANCES.....28

1.6. HIPÓTESIS 29

1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL 29

1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS 29

1.7. SISTEMA DE VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES 30

1.7.1. VARIABLE INDEPENDIENTE.....30

1.7.2. VARIABLE DEPENDIENTE 30

CAPITULO II MARCO TEÓRICO 32

2.1. ANTECEDENTES O REVISIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS.....32

2.2. BASES TEÓRICAS. 35
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS 50
CAPITULO III METODOLOGÍA 52
3.1. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS UTILIZADAS. 52
3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN. 53
3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN. 53
3.1.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN. 53
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA 57
3.2.1. POBLACIÓN 57
3.2.2. MUESTRA 57
3.3. PROCEDIMIENTOS. 58
CAPITULO IV PRESENTACION DE RESULTADOS 72
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS 72
4.1.1. Resultados de la estadística descriptiva 72
4.1.2. Resultados de la prueba de hipótesis 141
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 154
CONCLUSIONES 158
RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS 160
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 161
ANEXOS 165
Anexo N°01 – Matriz de Consistencia 166
Anexo N°02 – Ensayos de laboratorio 167
Anexo N°03 – Panel Fotográfico 179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Definición operacional de variables, dimensiones e indicadores.* 31

Tabla 2 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero … y pendiente s=… %.* 56

Tabla 3 *Tamaño de muestra y sub muestra de ensayos.* 57

Tabla 4 *Valores de magnitud de los pasos del caudalímetro en m3/h.* 61

Tabla 5 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=1%.* 72

Tabla 6 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.* 73

Tabla 7 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 75

Tabla 8 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 77

Tabla 9 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 79

Tabla 10 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.* 82

Tabla 11 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=1.5%.* 84

Tabla 12 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 85

Tabla 13 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 87

Tabla 14 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 89

Tabla 15 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 91

Tabla 16 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.* ... 93

Tabla 17 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=2%.* 95

Tabla 18 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 96

Tabla 19 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 98

Tabla 20 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 100

Tabla 21 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 102

Tabla 22 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 104

Tabla 23 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=1%.* 106

Tabla 24 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.* 107

Tabla 25 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 109

Tabla 26 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 111

Tabla 27 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 113

Tabla 28 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.*... 115

Tabla 29 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=1.5%.* ... 117

Tabla 30 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%* ... 118

Tabla 31 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* ... 120

Tabla 32 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* ... 122

Tabla 33 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* ... 124

Tabla 34 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.* 126

Tabla 35 *Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=2%.* ... 128

Tabla 36 *Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%* ... 129

Tabla 37 *Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.* ... 131

Tabla 38 *Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=2%.* ... 133

Tabla 39 *Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.* ... 135

Tabla 40 *Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.*... 137

Tabla 41 *Simulación computacional de vertedero trapezoidal y semicircular de pared delgada.* 139

Tabla 42 *Prueba de Normalidad.* 141

Tabla 43 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.* 142

Tabla 44 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.* 143

Tabla 45 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.* 144

Tabla 46 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.* 145

Tabla 47 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.* 146

Tabla 48 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.* 147

Tabla 49 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.* 148

Tabla 50 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.* 149

Tabla 51 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.* 150

Tabla 52 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.* 151

Tabla 53 *Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.* 152

Tabla 54 *Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.* 153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Parámetros hidráulicos de canal de ensayo.* 38

Figura 2 *Esquema del régimen variable de agua en un canal.* 40

Figura 3 *Terminología de flujo a través de un vertedero.* 41

Figura 4 *Coeficientes de vertedero según el espesor de la pared.* 42

Figura 5 *Modelo de vertedero de cresta delgada.* 43

Figura 6 *Dimensiones del vertedero de medición trapezoidal.* 44

Figura 7 *Esquema de la sección transversal de vertedero de medición trapezoidal.* 45

Figura 8 *Dimensiones del vertedero de medición semicircular.* 46

Figura 9 *Esquema de la sección transversal de vertedero de medición semicircular.* 46

Figura 10 *Diagrama de la dinámica de fluidos computacional.* 48

Figura 11 *Diagrama de procesos para modelación CFD.* 49

Figura 12 *Vista satelital de la zona de estudio*..... 52

Figura 13 *Esquema del canal de ensayo HM 160*. 54

Figura 14 *Vista de juego de vertederos de pared delgada*..... 55

Figura 15 *Ajuste de inclinación longitudinal inicial del canal de ensayo*..... 58

Figura 16 *Ajuste de presa en sección de medición del canal de ensayo*. 59

Figura 17 *Ajuste del caudal del canal de ensayo*..... 60

Figura 18 *Medición de nivel de aguas arriba en el canal de ensayo*..... 61

Figura 19 *Límite de medición de caudal en canal de ensayo con vertedero*..... 62

Figura 20 *Ajuste de la inclinación del canal de ensayo*..... 63

Figura 21 *Geometría de canal rectangular y vertedero trapezoidal con modelación CFD.* 65

Figura 22 *Geometría de canal rectangular y vertedero semicircular con modelación CFD.* 66

Figura 23 *Generación de las condiciones de malla tetraédrica en vertedero trapezoidal.* 66

Figura 24 *Generación de las condiciones de malla tetraédrica en vertedero semicircular.* 67

Figura 25 *Zona de entrada (inlet) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.* 68

Figura 26 *Zona de salida (outlet) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.* 68

Figura 27 *Zona de simetría (symmetry) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.* 69

Figura 28 *Fracción de volumen de agua sobre el vertedero trapezoidal en canal rectangular.* 70

Figura 29 *Fracción de volumen de agua sobre el vertedero semicircular en canal rectangular.* 70

Figura 30 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 74

Figura 31 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 76

Figura 32 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.* 77

Figura 33 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 78

Figura 34 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.* 79

Figura 35 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.* 80

Figura 36 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.* 81

Figura 37 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal para pendiente s=1.5%.* 86

Figura 38 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 87

Figura 39 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.* ... 88

Figura 40 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 89

Figura 41 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.* ... 90

Figura 42 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.* 91

Figura 43 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.* ... 92

Figura 44 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal para s=2%.* 97

Figura 45 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 98

Figura 46 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 99

Figura 47 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 100

Figura 48 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 101

Figura 49 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 102

Figura 50 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 103

Figura 51 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 108

Figura 52 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 109

Figura 53 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.*.... 110

Figura 54 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 111

Figura 55 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.*.... 112

Figura 56 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.* 113

Figura 57 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.*.... 114

Figura 58 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular para pendiente s=1.5%.* 119

Figura 59 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* 120

Figura 60 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.* 121

Figura 61 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* 122

Figura 62 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.* 123

Figura 63 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.* 124

Figura 64 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.* 125

Figura 65 *Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular para s=2%.*..... 130

Figura 66 *Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.* 131

Figura 67 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.* 132

Figura 68 *Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.* 133

Figura 69 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.*... 134

Figura 70 *Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.* 135

Figura 71 *Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.*... 136

Figura 72 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.* 143

Figura 73 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.* 145

Figura 74 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.* 147

Figura 75 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.*....149

Figura 76 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.*....151

Figura 77 *Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.*.....153

Figura 78 *Vertedero trapezoidal: coeficientes de vertedero para hw = 0.15 m.* ..154

Figura 79 *Vertedero semicircular: coeficientes de vertedero para hw = 0.15 m.*.155

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, varios países europeos vienen desarrollando herramientas computacionales que permiten simular tipos de ecuaciones y modelos matemáticos, de modo que pueda obtenerse resultados confiables y cercanos a la realidad de manera más rápida y certera y utilizando menos recursos económicos.

En este contexto, el presente estudio busca determinar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal de ensayo rectangular con pendiente variable de manera experimental en laboratorio, cuyos datos se comparan con los resultados obtenidos de la simulación computacional de dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) utilizando un software profesional aplicado en la simulación de modelos matemáticos hídricos.

El capítulo I “Planteamiento del problema” describe y fundamenta el problema de la investigación, enfoca la idea principal, se plantean los objetivos e hipótesis de la investigación.

El capítulo II “Marco teórico” explica las definiciones básicas de los términos y variables utilizados en la operacionalización de las variables.

En el capítulo III “Metodología de la investigación” se menciona el diseño y esquema de la investigación, así como el procesamiento y tratamiento de los datos.

En el capítulo IV “Resultados” se muestran los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio y los modelos geométricos matemáticos de vertederos.

En el capítulo V “Discusión de resultados” se analiza y se discute los resultados obtenidos, el coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal y tipo semicircular, de manera experimental y de la modelación CFD en base a los estudios previos.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA

El agua es un elemento líquido vital de gran necesidad para sostener la vida en el planeta, se podría decir que, el agua fue un factor primordial en el origen y la evolución de la vida en el planeta (David Darling, 2016). Para el aprovechamiento y gestión del agua en los canales abiertos, se utiliza mayormente los vertederos o presas. Los vertederos son estructuras hidráulicas “por el cual se obliga a pasar el agua a través de una abertura denominada ventana o escotadura” (Navarro Escobar, 2024, p.20).

En el caso de canales naturales abiertos, debido a su forma irregular y su impredecibilidad, pueden variar en sus dimensiones, profundidad, geometría y pendiente longitudinal. Sin embargo, en las obras de canales hidráulicos se observan diseños con una geometría, dimensiones y pendiente definida y constante (Rojas & Cajas, 2023).

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas incorporó en la Agenda 2030 un objetivo específico para el desarrollo sostenible sobre agua y saneamiento, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua para todos (Ángel Simón, 2018).

A nivel global, en varios países como España, México y Colombia, múltiples universidades implementaron sus laboratorios con equipos y modelos computacionales avanzados para realizar ensayos en la rama de ingeniería hidráulica, entre ellos, determinar el coeficiente de gasto de vertederos de diferentes formas geométricas y espesores, en canales abiertos de ensayo.

Por otro lado, las lluvias en Latinoamérica se manifiestan con mucha intensidad tanto que en las ciudades las infraestructuras viales tuvieron que implementar sistemas de alcantarillado y drenaje para evitar que el efecto de las lluvias no produzca inundaciones (Navarro Escobar, 2024).

A nivel nacional, en el Perú, alrededor del año 2017, un fenómeno natural afectó la ciudad de Lima, las corrientes de agua desplazaron lodos, desperdicios, para lo cual no eran

aptos los vertederos de formas tradicionales como triangular y rectangular, frente a ello, las universidades empezaron a abordar el problema a través de estudios, implementación de equipos tecnológicos para ampliar conocimientos en la rama de hidráulica (Rojas & Cajas, 2023), y empezaron a desarrollar diseños de vertederos con formas no tradicionales (Navarro Escobar, 2024) en canales de ensayo con pendiente variable.

En el departamento de Ucayali, ubicado en zona de selva baja, el problema ocurre en las comunidades rivereñas sobre las inundaciones de plantaciones y sembríos provocados por el incremento del nivel de las aguas del río Ucayali debido a las constantes lluvias intensas que ocurren en nuestra región tropical.

Como vemos, existe un problema en la gestión del agua en canales abiertos, y a nivel nacional, se tiene poca información y estudios previos referentes a vertederos de pared delgada con geometría de formas no convencionales como trapezoidal o semicircular, ya que requiere la implementación física de un canal de ensayo con pendiente variable para determinar el gasto real mediante estos vertederos y diseños no convencionales.

Este gasto real es clave en la ingeniería hidráulica, ya que permite estimar con precisión el caudal que atraviesa el vertedero bajo diversas condiciones de flujo, lo que influye directamente en el diseño y operación de estructuras hidráulicas (Navarro Escobar, 2024).

A todo esto, el uso de herramientas de modelación (CFD) permite reproducir con mayor precisión el fluido de agua sobre vertederos en un canal de sección determinada, este método ha sido validado y aplicado en varios estudios a nivel global. De esta manera, se puede estimar el gasto real de flujo que dejará pasar un vertedero al momento de realizar el diseño de la misma.

En ese contexto, esta investigación aborda la determinación experimental y computacional del coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal de ensayo rectangular de pendiente variable del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil (EPIC) en la Universidad Nacional de Ucayali (UNU), aplicando técnicas y software de simulación computacional de fluidos (CFD) para modelar los ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal y

semicircular del canal rectangular de pendiente variable, de esta manera se busca destacar la importancia de la determinación de estos datos para el diseño de vertederos en proyectos de canales hidráulicos, que son de gran utilidad para el aprovechamiento de los recursos hídricos y controlar los caudales en zonas agrícolas rurales.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿Cuáles son los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal rectangular de pendiente variable, aplicando modelación CFD?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la relación entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable?
- ¿Cómo influye la variación de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de un canal rectangular de pendiente variable en los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular?
- ¿Cuál es la relación entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable, aplicando modelación CFD.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la relación entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal de pendiente variable.
- Evaluar la influencia de la variación de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de

un canal rectangular de pendiente variable en los coeficientes de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

- Determinar la relación entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El estudio se fundamenta en la necesidad de optimizar los métodos de medición de caudales en canales rectangulares abiertos, mediante el desarrollo de coeficientes de gasto calibrados para vertederos de formas tipo trapezoidal y semicircular.

Desde el punto de vista metodológico, se justifica la búsqueda de métodos que optimicen el tiempo requerido y el costo en los proyectos de medición de caudal en canales rectangulares abiertos, mediante la obtención de coeficientes de gasto calibrados y validados para geometrías específicas, ensayadas experimentalmente bajo condiciones contraladas de laboratorio. Como afirman Salazar & Cedillo (2017), con la simulación es posible determinar de manera analítica y computacional el flujo en vertederos, contemplando las condiciones iniciales y de contorno de los modelos hidráulicos.

Además, el aporte técnico del estudio es importante ya que se aplica el conocimiento ingenieril y se convierte en criterios prácticos de diseño para construir vertederos de pared delgada en la Amazonía, en el estudio se suma la validación experimental y computacional de los resultados (coeficientes de gasto) lo cual se compara con los valores propuestos por normas o autores de otras regiones con una realidad diferente a la nuestra.

El desarrollo del estudio aplica técnicas y software de simulación computacional de fluidos (CFD) para los modelos hidráulicos de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular con pendiente variable (1%, 1.5% y 2%), el cual busca consolidar las bases del conocimiento matemático y computacional en el área de ingeniería hidráulica en la región.

Aunado a lo anterior, se busca fomentar en los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali, la innovación, el desarrollo y la

investigación de problemas hidrológicos y fenómenos reales utilizando los equipos que cuenta el laboratorio de Estructura e Hidráulica. Adicionalmente, Rojas y Cajas (2023), afirman que “la determinación de estos coeficientes facilita la comprensión de las descargas de este tipo de estructuras y la elaboración de gráficos y/o tablas resulta un aporte para los estudiantes del área de hidráulica de nuestra universidad”.

A continuación, se presenta los siguientes criterios que sostienen la justificación y los beneficios de la investigación, es decir, su alcance o proyección social:

a) Justificación teórica.

El estudio permite calcular analíticamente el gasto de vertederos trapezoidal y semicircular mediante cálculos simples. La determinación de estos coeficientes facilita la comprensión del gasto hídrico de este tipo de estructuras, la elaboración de gráficos y tablas del estudio será un aporte para los estudiantes del área de hidráulica de nuestra universidad.

b) Beneficio económico

El estudio tiene la capacidad de mejorar la eficiencia en la gestión del recurso hídrico, a través de la evaluación del gasto hídrico de vertederos según su forma (trapezoidal, semicircular), lo que más adelante puede traducirse en una mejor planificación de los recursos hídricos para los sectores de agricultura, riego y abastecimiento urbano.

c) Beneficio metodológico.

La investigación se basa en el método científico para lograr los objetivos y demostrar las hipótesis siguiendo una metodología clara y precisa. Para el diseño de vertederos de pared delgada, se puede medir el caudal a través de ensayos de laboratorio con vertederos de pared delgada de formas geométricas tradicionales, aplicando las fórmulas y ecuaciones empíricas se obtiene como resultado los coeficientes de gasto de vertedero.

d) Beneficio social.

El presente estudio tiene la capacidad de facilitar la toma de decisiones en proyectos de agricultura, riego y abastecimiento de agua, es decir, ofrece valores técnicos de gran utilidad al momento de diseñar canales hidráulicos y vertederos para control del caudal, este enfoque beneficia principalmente a las poblaciones rurales que dependen de sistemas de

irrigación y abastecimiento de agua mediante canales, el cual tiene un alcance social que se puede aplicar a otras comunidades de la región.

e) Beneficio ambiental.

Permite diseñar vertederos que minimicen el impacto ecológico, el aprovechamiento hídrico según la geomorfología del canal, sin afectar el estado del aire ni el suelo.

2.4.2. VIABILIDAD

La investigación es viable técnica y logísticamente, ya que se cuenta con un canal de ensayo rectangular de pendiente variable instalado en el laboratorio de Estructura e Hidráulica de la universidad y personal técnico capacitado para los ensayos.

Desde el punto de vista económico, el presupuesto del proyecto se cumple, de acuerdo al cronograma de actividades y además los complementos que sean necesarios se pueden conseguir en el mercado.

Los resultados de este tipo de estudios se traducen en alternativas de optimización de la gestión hídrica y de infraestructuras de manera sostenible, es decir, tiene un impacto a corto y largo plazo la confiabilidad de los resultados para proyectos bajo el marco normativo.

1.5. LIMITACIONES Y ALCANCES.

1.5.1 Limitaciones.

En la región no se observa proyectos hidráulicos de riego y control de caudales en zonas agrícolas cercanas al lugar de la investigación, sin embargo, es posible estudiar este fenómeno físicamente en el canal de ensayo del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Universidad Nacional de Ucayali y evaluar modelos hidráulicos de vertederos con distintas formas geométricas.

No se puede medir las velocidades con el velocímetro, ya que las velocidades de flujo antes de pasar por los vertederos del canal de ensayo son muy pequeños.

El tiempo de acceso a las unidades muestrales puede estar limitado por los horarios académicos y permisos que sean necesarios obtener de la Universidad Nacional de Ucayali, no obstante, se pudo acceder satisfactoriamente a la muestra.

1.5.2 Alcances.

Por su diseño, el presente estudio tiene un alcance experimental correlacional, es decir, se va determinar la relación o influencia de las variables Nivel del agua, Caudal y Pendiente longitudinal sobre el coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada según su geometría (trapezoidal, semicircular) en un canal rectangular de 86x300 mm de pendiente variable (1%, 1.5%, 2%), en el laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Universidad Nacional de Ucayali.

El canal de ensayo rectangular consiste en un modelo físico fabricado con paredes de vidrio de seguridad templado, en un fondo de acero inoxidable, con una manivela de inclinación longitudinal del canal, y los vertederos o presas de pared delgada consisten en placas de acero inoxidable de espesor de 2 mm montados sobre unos soportes con zócalo de fijación de la base en el canal de ensayo, para los ensayos experimentales de laboratorio se mandó fabricar e implementar presas de forma trapezoidal y semicircular de acuerdo a las características técnicas del manual de laboratorio, estas presas son objeto fundamental de esta investigación.

La modelación CFD se realizó con un software capaz de simular un modelo numérico con las condiciones del ensayo y dar resultados válidos y confiables, en este caso, se optó por elegir la utilización del software Ansys Student, versión para estudiantes.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL

- La modelación CFD es determinante para evaluar y obtener los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable.

1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Existe una relación significativa entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable.
- Influye la variación ascendente de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de un canal rectangular de pendiente variable, lo que causa el incremento de los coeficientes

de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

- Existe una relación significativa entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared tipo trapezoidal y semicircular.

1.7. SISTEMA DE VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES

1.7.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Modelo de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal de ensayo rectangular.

X1: Caudal de entrada.

X2: Pendiente longitudinal.

X3: Geometría.

X4: Nivel de aguas arriba.

1.7.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

Tabla 1

Definición operacional de variables, dimensiones e indicadores.

Variable	Definición Operacional	Dimensión	Sub dimensión	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Escala	Instrumento
Variable independiente: Modelo de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal de ensayo rectangular	Se miden los factores de ajuste para determinar los valores del gasto mediante vertederos de pared delgada el cual debe variar en función de los factores: caudal de entrada, pendiente longitudinal, geometría y nivel de aguas arriba sobre el vertedero.	Caudal de entrada	Volumen	Cantidad de agua del recipiente al canal	L	Cuantitativo	Razón continua	Caudalímetro y recipiente
			Tiempo	Duración en llenar un recipiente graduado	seg	Cuantitativo	Razón continua	Cronómetro
			Caudal	Cantidad de agua que fluye en el canal por unidad de tiempo	m^3/h	Cuantitativo	Razón continua	Caudalímetro y recipiente
		Pendiente longitudinal	Pendiente	Inclinación longitudinal del canal en rango: 1, 1.5 y 2	%	Cuantitativo	Nominal	HM 160 Canal de ensayo 86x300mm
		Geometría	Dimensión del canal	Ancho, largo y altura	m	Cuantitativo	Nominal	Flexómetro
			Dimensión de vertedero	Ancho, altura y espesor Abertura	m	Cuantitativo	Nominal	Regla metálica
		Nivel de aguas arriba	Altura	Altura de agua sobre la cresta del vertedero	m	Cuantitativo	Razón continua	Regla metálica
Variable dependiente: Coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular	Se determina el caudal teórico del modelo de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular, la relación entre el caudal real y el caudal teórico del canal de ensayo rectangular.	Caudal teórico	Caudal de vertedero trapezoidal	Cantidad de agua que fluye teóricamente en el canal por unidad de tiempo	m^3/h	Cuantitativo	Razón continua	Ecuación de Cipolletti
			Caudal de vertedero semicircular	Cantidad de agua que fluye teóricamente en el canal por unidad de tiempo	m^3/h	Cuantitativo	Razón continua	Ecuación de Villón Béjar
		Coeficiente de gasto experimental	Relación	Relación experimental entre caudal real y caudal teórico	(ª)	Cuantitativo	Razón continua	HM 160 Canal de ensayo 86x300mm
		Coeficiente de gasto con modelación CFD	Relación	Relación entre caudal real y caudal teórico computacional	(ª)	Cuantitativo	Razón continua	Ansys Student 2025 R2

Nota. (ª): variable adimensional. Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES O REVISIÓN DE ESTUDIOS REALIZADOS.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

García Martino (2024), en su estudio denominado “SIMULACIÓN CFD DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE UN BARCO BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OLEAJE”, tuvo como objetivo desarrollar una metodología para predecir el comportamiento hidrodinámico de un barco utilizando técnicas de modelación CFD, con una metodología aplicada, con un diseño experimental, basado en métodos numéricos y potentes técnicas de simulación computacional para analizar el comportamiento real del casco de un buque en diferentes condiciones de navegación. Los resultados de la simulación CFD permitieron representar el experimento en un régimen no estacionario, el análisis de sensibilidad de la malla dio similitud entre las soluciones halladas para cada tipo de mallado, además sirve para estimar los coeficientes de arrastre el cual sienta las bases para futuras investigaciones que plantean varias formas posibles del casco.

Badules Martínez (2023), en su investigación denominada “APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN EL DISEÑO Y ESTUDIO DE PULVERIZADORES HIDRONEUMÁTICOS”, tuvo como objetivo profundizar en el estudio de pulverizadores hidroneumáticos mediante metodologías que usen la dinámica de fluidos computacional (CFD), usaron una metodología con un diseño experimental, con un enfoque global y sistémico de los pulverizadores y los tratamientos que aplican. Los resultados de la modelación con CFD permitieron obtener las velocidades medias para probar diseños de tanques y sistemas de agitación sin necesidad de fabricarlos, además encontraron que un mayor caudal de aire disminuye las pérdidas al suelo y mejora el porcentaje de líquido pulverizado sobre el cultivo, finalmente el método permite estudiar aspectos sustanciales que en la práctica experimental no sería viable.

Quishpe Songor (2021), en su investigación titulada “MANUAL DE PRÁCTICAS VIRTUALES DE LABORATORIO, APLICANDO MODELACIÓN NUMÉRICA (CFD) PARA USO EN LAS ASIGNATURAS DE MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA APLICADA”, su objetivo fue desarrollar modelos básicos de estructuras hidráulicas y ensayos tales como orificios, presión hidrostática, vertederos, compuertas y bocatomas con el software Flow 3D en los laboratorios virtuales de la Universidad Politécnica Salesiana, con una metodología aplicada, con un diseño experimental de corte transeccional, con una muestra conformada por modelos de vertederos de pared ancha, vertederos de pared delgada y vertederos tipo WES. En los resultados resalta los modelos de vertederos estudiados, de pared ancha, de pared delgada y tipo WES, concluyendo con la presentación del manual de uso del software y consideración de los tipos de vertederos estudiados.

Díaz Alarcón (2020), en su estudio titulado “MODELACIÓN MEDIANTE SOFTWARE CFD DE LOS ENSAYOS DE VERTEDERO RECTANGULAR Y TRIANGULAR DEL CANAL HIDRÁULICO DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS AQUINO, SEDE VILLAVICENCIO” su objetivo fue replicar las condiciones de flujo de agua de vertederos rectangular y triangular en canal hidráulico mediante herramientas de simulación CFD, con una metodología aplicada, con un diseño experimental, basado en métodos numéricos y modelación matemática con potentes herramientas de simulación. En los resultados se observa variación de los niveles de agua en función de la calidad del mallado considerado durante la modelación de la geometría y condiciones de entorno del elemento, y variación de las presiones y desplazamientos de masa de agua en función del control de caudales.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Navarro Escobar (2024), en su trabajo de investigación titulado “EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE GASTOS EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO: SEMICIRCULAR, PARABÓLICO, TRAPEZOIDAL Y SUTRO EN CANALES RECTANGULARES”, su objetivo fue evaluar de manera experimental los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada, semicircular, parabólico, trapezoidal y sutro en canales

rectangulares del laboratorio de la Universidad Privada del Norte, Lima. Esta investigación siguió la ruta cuantitativa, tuvo un alcance descriptivo y un diseño no experimental. Los resultados mostraron que el incremento del caudal en el canal genera mayor altura de agua sobre el vertedero, concluyendo que el caudal tiene una relación directa con el nivel de agua, además la factibilidad de determinar los coeficientes de gasto de vertederos de manera matemática con ayuda de un vertedero patrón calibrado.

Molina & Tafur (2023), en su estudio denominado “ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL VERTEDERO TIPO CRUMP DE TRES CRESTAS PARA UN SISTEMA DE MUESTREO AGUAS ARRIBA DEL PUENTE DEL RÍO CHILLOROYA EN CUSCO”, tuvo como objetivo analizar experimental y computacionalmente el tipo de vertedero Crump de tres crestas para un sistema de muestreo del río Chilloroya, Cusco. Con una metodología aplicada, tipo descriptivo y diseño experimental, obtuvo como resultado un coeficiente de descarga de 1.022 para la cresta central y 1.007 para las crestas laterales los cuales presentaron variación al valor teórico de 0.63.

López y Chung (2023), en su trabajo de suficiencia profesional denominado “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN VERTEDERO TRIANGULAR Y MODELACIÓN CON OPENFOAM”, tuvieron como objetivo analizar la carga hidráulica de un vertedero de pared delgada de forma triangular de manera experimental y mediante un modelo numérico, con una metodología aplicada, con un diseño pre experimental, basado en técnicas de modelación CFD. Los resultados revelan que la selección del tamaño de malla de 0.01-0.05 tuvo mejor comportamiento hidráulico que la malla de 0.007-0.03, lo cual fue demostrado estadísticamente utilizando fórmulas estadísticas, coeficiente de Nash, coeficiente de determinación, raíz del error cuadrático medio, error porcentual medio absoluto y error absoluto medio.

Tesen Macazana (2022), en su estudio titulado “ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE DESCARGA EN VERTEDEROS TRIANGULARES, RECTANGULARES Y TRAPEZOIDALES EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO”, su objetivo fue evaluar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada,

triangular, rectangular y trapezoidal en laboratorio. Su estudio fue de tipo aplicada y un diseño experimental. En los resultados se observa las alteraciones en la medición de caudales, obteniendo las curvas de calibración para mejorar la medición del caudal en función de la carga hidráulica, concluyendo que el análisis del coeficiente de gasto de vertedero trapezoidal presentó mayor alteración en la medición de caudales que el resto.

2.1.3. Antecedentes locales.

Rojas & Cajas (2022), en su investigación titulada "*Coeficientes de gasto en vertederos triangulares, rectangular con contracción y sin contracción lateral en el canal de ensayo del laboratorio de estructura e hidráulica de la Universidad Nacional de Ucayali",* desarrollaron una investigación experimental de laboratorio con enfoque cuantitativo para determinar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada en un canal rectangular con pendiente variable. Los investigadores utilizaron métodos analíticos y computacionales para determinar y validar los resultados obtenidos de manera experimental de laboratorio, y finalmente recomiendan explorar beneficios y costos de nuevos diseños de vertederos variando factores (geometría, espesor, material del canal, parámetros).

2.2. BASES TEÓRICAS.

2.2.1 Teorías sobre los canales abiertos.

En la ingeniería hidráulica, se descompone de dos aspectos importantes que se diferencian por el comportamiento del flujo, estos son: flujo por gravedad y flujo a presión.

El flujo a presión se refiere aquellos sistemas que funcionan con el flujo en toda la sección interior llena de la tubería.

Este sistema comprende por ejemplo los sistemas de distribución de agua potable de las ciudades, los conductos de riego agrícola y las bombas hidráulicas que permiten captar el flujo.

Por otro lado, el flujo por gravedad se refiere aquellos sistemas donde el agua fluye por gravedad y la sección interior del canal no está completamente lleno.

Este sistema comprende por ejemplo el drenaje pluvial, las aguas de riego, la distribución de tanques elevados en zonas rurales. El estudio se enfoca en la hidráulica de flujo por gravedad.

CANALES

Un canal es un conducto, que puede ser natural o creado por el hombre, que permite el paso de un líquido a través de él únicamente por la acción de la fuerza gravitacional a través de una superficie abierta o libre (Ngamalieu, 2015).

La ecuación de continuidad establece que en una tubería o conducto, independientemente de su sección, y siempre que no haya derivaciones, el volumen de fluido que ingresa por uno de sus extremos es el mismo que debe salir por el otro extremo. Esto quiere decir que, según la configuración del vertedero, tanto el área como la velocidad van a cambiar, puesto que cada diseño es único (Navarro Escobar, 2024). La fórmula de la continuidad es la siguiente:

$$Q = VA$$

Donde:

Q: se refiere al caudal del canal en m3/s

v: se refiere a la velocidad promedio de la sección del flujo en el canal en m/s

A: se refiere al área transversal de la sección del canal en m2

En la práctica de caudales pequeños se aplica mayormente la fórmula de caudal volumétrico para determinar la cantidad de agua que pasa por una sección en una unidad de tiempo, ya que resulta factible su medición y operación. Para este método se requiere conocer el volumen recolectado de agua, mediante un recipiente o probeta graduada, y la duración determinada de la recolección de agua, generalmente en segundos. La fórmula para determinar el caudal por el método volumétrico es el siguiente:

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

Donde:

Q: se refiere al caudal del canal en m3/s

V: se refiere al volumen o cantidad de agua que fluye en el canal en m3

T: se refiere a la duración de la medición con este método, en segundos.

CANAL HIDRODINÁMICO

El canal hidrodinámico es un equipo básico de composición modular con el que se pueden hacer numerosos ensayos visibles al comportamiento de las corrientes. Este ofrece muchos aspectos interesantes de la investigación y de la teoría y con el uso de amplios accesorios, la posibilidad de realizar ensayos en todos los sectores de la hidráulica. El cual utilizamos para poder desarrollar las pruebas que finalmente nos proporcionen los datos característicos del fluido, y a partir de éstos, obtengamos los coeficientes de gasto para el medidor Venturi, en el cual realizamos los ensayos. (Pérez, 2005)

En 1889 el Ingeniero Irlandés Robert Manning presentó una ecuación para determinar el valor de “C”, en función del radio hidráulico y la rugosidad del material del cual está construido el canal. Esta ecuación es el resultado del proceso de ajuste de curvas, por tanto, es completamente empírica.

$$v = \frac{1}{n}(Rh)^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

V: se refiere a la velocidad del flujo en el canal en m/s

n: se refiere al coeficiente de rugosidad que no tiene dimensión

S: se refiere a la pendiente del tubo en m/m

Rh: se refiere al radio hidráulico de la sección del canal

La ecuación de Manning más adelante fue modificada y simplificada hasta llegar a su conocida forma actual. Para utilizar la ecuación de Manning debemos conocer el sistema de unidades a utilizar, para que se utilice el coeficiente apropiado. (Fernández, 2008)

ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación o teoría de Bernoulli es una de las ecuaciones fundamentales para analizar el comportamiento de un fluido que pasa por una sección de canal.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho {v_1}^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho {v_2}^2 + \rho g h_2$$

Donde:

P: se refiere a la presión del agua en el canal

p: se refiere a la densidad del agua

v: se refiere a la velocidad del flujo en el canal

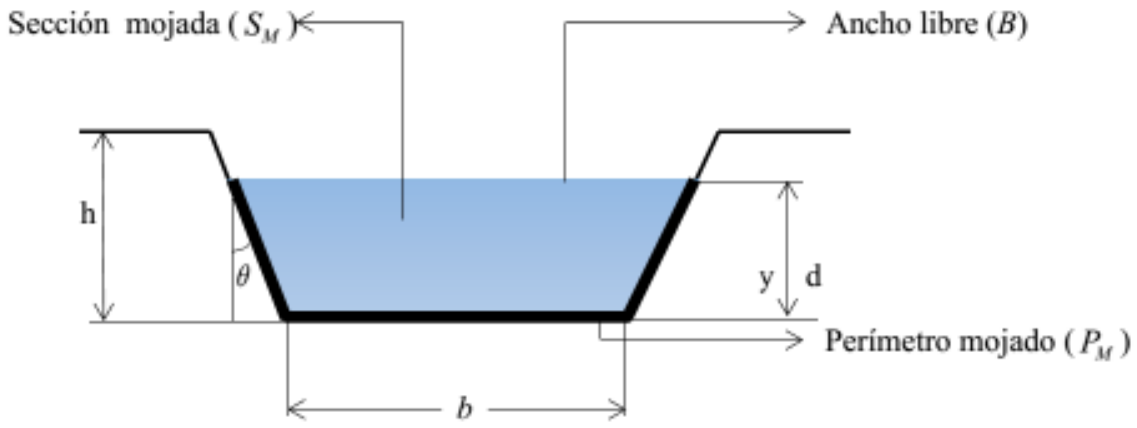
h: se refiere a la altura del nivel de agua en el canal

PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE UN CANAL EN SECCIÓN TRANSVERSAL.

En la Figura 1 se muestra los parámetros fundamentales en la sección transversal para el diseño de canales abiertos, que se refiere a la sección mojada (SM), ancho libre (B), el perímetro mojado (PM), peralte de la sección mojada (d) y la profundidad del flujo (y).

Figura 1

Parámetros hidráulicos de canal de ensayo.



Fuente: Figura I.3 de Ngamalieu (2015).

La sección mojada (SM): se refiere a la parte de la sección transversal que está ocupada por el agua.

El perímetro mojado (PM) se refiere a la línea que une los puntos más altos de los cajeros en un canal y atraviesa el ancho de base.

Con los dos parámetros anteriores, se determina el radio hidráulico (Rh), el cual es un parámetro de forma del canal, y se determina “por la relación entre la sección mojada (SM) y el perímetro mojado (PM)” (Ngamalieu, 2015, p.13), la ecuación del radio hidráulico es el siguiente:

$$R_h = \frac{S_M}{P_M}$$

El peralte de la sección mojada (d) se refiere a la distancia entre el punto más bajo del canal y la lámina de agua, de manera perpendicular al flujo.

La profundidad del flujo (y) se refiere a la distancia vertical más corta entre el fondo del canal y la lámina de agua.

El ancho libre (B), también denominado espejo de agua, se refiere a la medida de la sección a nivel de la lámina de agua.

Otro parámetro importante en el diseño de canales es la profundidad hidráulica (D) que se refiere a la relación entre la sección mojada (SM) y el ancho libre (B), la ecuación de la profundidad hidráulica es la siguiente:

$$D = \frac{S_M}{B}$$

El talud (Z) se refiere a la inclinación lateral de las paredes en la sección transversal del canal, el cual se expresa por la distancia horizontal recorrida por la pared de la sección del canal para aumentar una unidad de longitud en dirección vertical, su relación en el canal se manifiesta 1/z, cuando la pared es perpendicular al fondo del canal, el talud es infinito.

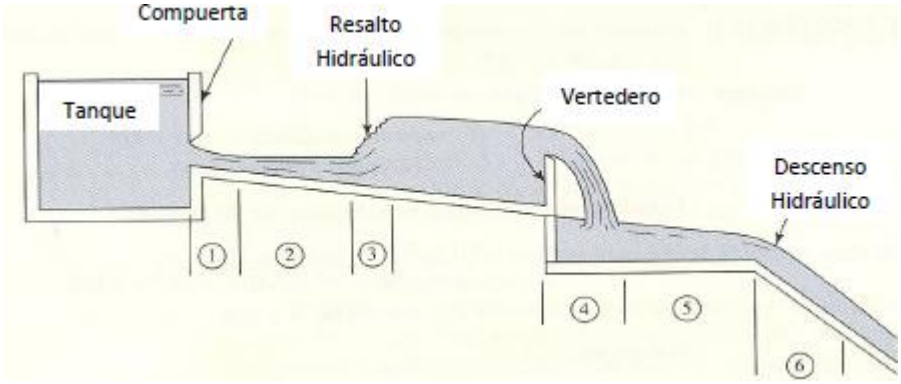
El borde libre se refiere a la distancia de seguridad que se diseña entre la superficie de corona (Zc) y el nivel de la lámina de agua.

ESQUEMA DEL RÉGIMEN DEL FLUJO EN CANAL CON PENDIENTE VARIABLE.

En el análisis del régimen existen ciertos comportamientos del flujo característicos según las características del canal, y el peralte del flujo de agua. (Ver Figura 1)

Figura 2

Esquema del régimen variable de agua en un canal.



Fuente: Figura I.5 de Ngamalieu (2015).

En la Figura 1 se muestra seis secciones que se manifiestan generalmente en un canal de ensayo.

La primera sección muestra un “flujo rápidamente variado”, es aquel que viene directamente del tanque de almacenamiento de agua.

La segunda sección muestra un “flujo gradualmente variado”, esto generalmente ocurre cuando el flujo no es uniforme.

La tercera sección muestra lo que se denomina en ingeniería como “resalto hidráulico”, ocurre cuando el nivel de la lámina de agua sufre un ascenso brusco debido a efectos del peralte de la sección mojada.

La cuarta sección muestra un “vertedero y caída hidráulica”, es decir el agua fluye por la abertura de una estructura que permite que el agua pase a partir de una determinada profundidad.

La quinta sección muestra un “flujo gradualmente variado”.

La sexta sección muestra un “descenso hidráulico”, es aquel en el que el agua experimenta una caída brusca del nivel de agua debido a la pendiente del canal.

2.2.2 Teorías de vertedero de pared delgada.

En la ingeniería hidráulica, un vertedero se refiere a “una estructura de tipo pared que puede tener una abertura a través de la cual fluya un líquido cuyo caudal pretende ser medido o controlado” (Salazar & Cedillo, 2017, p.6).

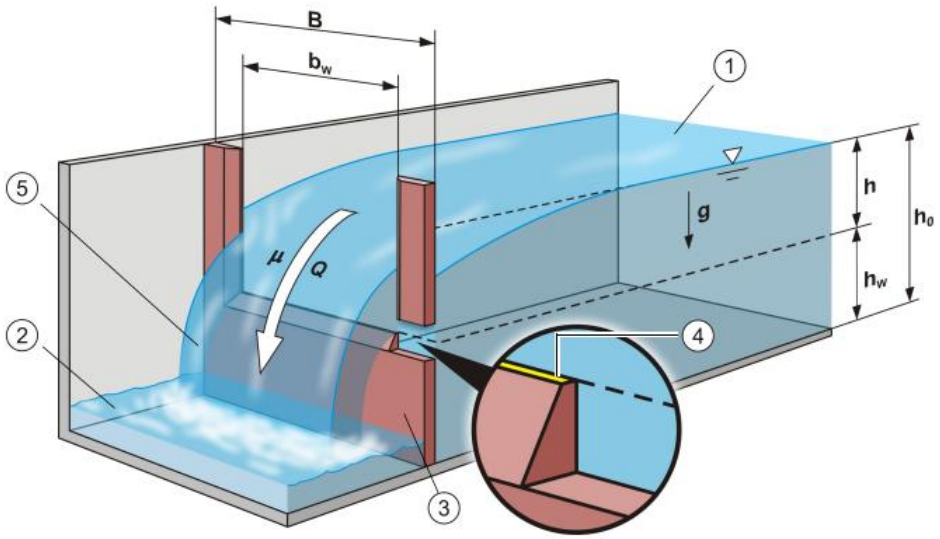
Según Marbello Pérez (2005), “un vertedero es un dique o pared que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida, causando una elevación del nivel aguas arriba, y se emplea para controlar niveles y/o para medir caudales”.

La arista o superficie más elevada del vertedero y además está en contacto con el fluido se llama cresta. La altura h se refiere a la distancia que existe entre de la lámina de fluido sobre la cresta, es responsable de la descarga sobre el vertedero. (Manual de laboratorio de Estructura e Hidráulica)

A continuación, se definen los términos más utilizados en la descripción del flujo a través de vertederos. (Ver Figura 3)

Figura 3

Terminología de flujo a través de un vertedero.



1	Aguas arriba
2	Aguas abajo
3	Dorso de la presa
4	Cresta de presa (borde de vertedero)
5	Napa

Fuente: Manual del equipo G.U.N.T. HM 160.30.

El flujo a través del vertedero tiene su fuerza en la gravedad, y el uso frecuente de los vertederos de pared delgada, como aforadores o controladores del nivel de agua, se debe a que son estructuras simples y permiten determinar la cantidad de agua que pasa por un canal,

conociendo el nivel del fondo del canal y el nivel de la lámina de agua o la carga sobre el vertedero (Pérez, 2005).

ECUACIONES PARA VERTEDEROS.

Una ecuación de vertedero es la relación funcional entre la altura *h* y la descarga sobre la presa Q. Las ecuaciones de vertedero dependen del tipo de construcción de la presa. Todas las ecuaciones de vertedero corresponden a la forma general: (*Manual de laboratorio de Estructura e Hidráulica*)

$$Q = [\dots] \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \mu \cdot h^n \quad ; \quad n > 1$$

COEFICIENTE DE VERTEDERO.

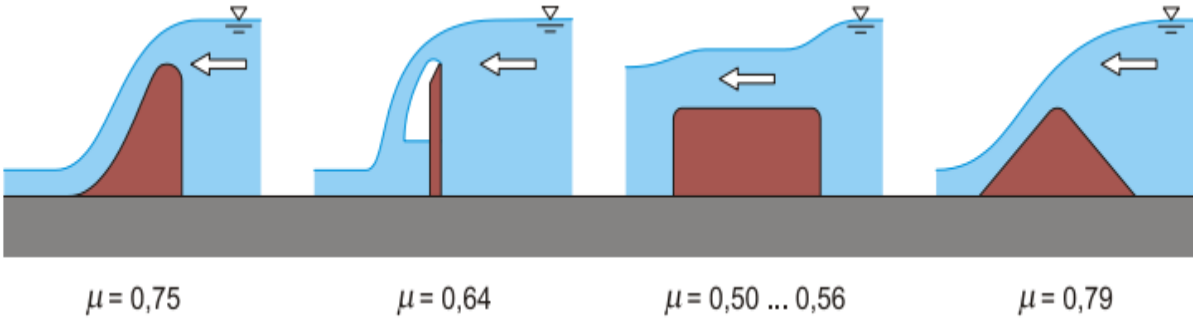
El coeficiente de vertedero o coeficiente de gasto es un factor adimensional que depende de las características del vertedero (forma, geometría, espesor). La ecuación de Poleni, describe la relación entre el coeficiente de vertedero μ y el grado de depresión ϕ como:

$$\mu = 1 - \phi^{1.5}$$

El coeficiente de vertedero depende fundamentalmente de la geometría de la presa. En la Figura 4 se muestran algunos valores del coeficiente de vertedero μ para cuatro formas típicas: presas de cresta Ogee, de pared delgada, de pared ancha, y en forma de tejado.

Figura 4

Coeficientes de vertedero según el espesor de la pared.



Fuente: Manual del equipo G.U.N.T. HM 160.30.

El coeficiente de gasto se puede determinar de manera experimental, para ello es necesario conocer el caudal real del canal, con método volumétrico u otros, y el caudal teórico del vertedero, analíticamente en base a la medición de la carga sobre el vertedero.

Una vez hallada la relación entre el caudal real Qr y el caudal teórico Qt, la expresión para determinar el coeficiente de vertedero se expresa como:

$$Cd = \frac{Qr}{Qt}$$

Donde:

Cd = Coeficiente de vertedero

Qr = Caudal real del canal

Qt = Caudal teórico del vertedero

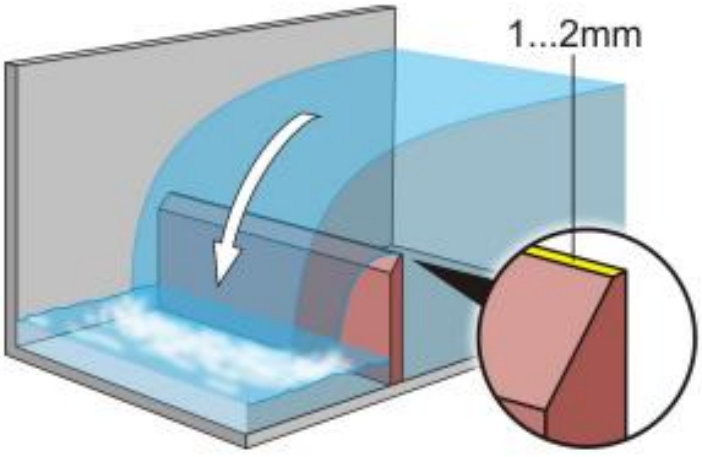
En esta investigación se enfoca sobre los vertederos de pared delgada en un canal de ensayo rectangular con pendiente variable.

VERTEDERO DE PARED DELGADA.

Una presa de cresta delgada consta de una placa vertical con un flujo incidente vertical. Una característica esencial de las presas de cresta delgada es el borde de vertedero extremadamente estrecho. La anchura del borde de vertedero es aprox. 1…2 mm.

Figura 5

Modelo de vertedero de cresta delgada.



Fuente: Manual del equipo G.U.N.T. HM 160.30.

NAPA DE AGUA.

Si existe una conexión entre el área detrás del vertedero y el entorno, este se airea. Debajo de la napa se forma un colchón de aire con presión ambiente. En este caso, la napa se despega del dorso del vertedero (napa libre).

La posibilidad más sencilla de aireación de un vertedero es una contracción lateral. Sin contracción, debe instalarse una instalación de aireación separada.

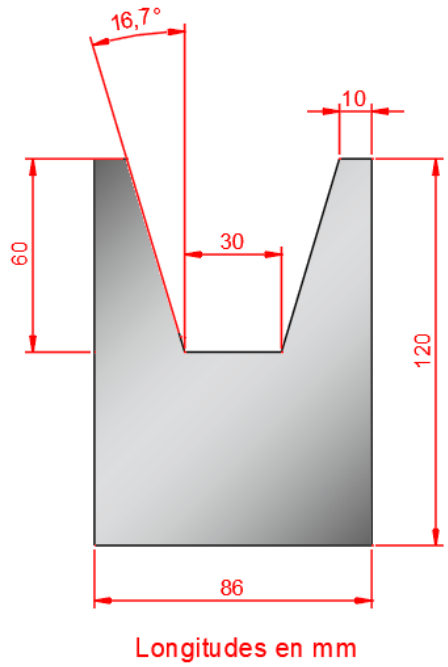
VERTEDERO DE MEDICIÓN TRAPEZOIDAL DE CIPOLLETI.

La presa trapezoidal de medición es el resultado de combinar una presa rectangular y otra triangular. La presa trapezoidal engloba las ventajas de la presa rectangular y de la triangular. La napa de una presa trapezoidal siempre está ventilada. No obstante, aunque tiene baja precisión en el área de medición inferior, tiene mayor precisión en el límite superior.

En la Figura 6 se observa las dimensiones de la placa de montaje del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal para medición de caudales en el canal de ensayo de pendiente variable.

Figura 6

Dimensiones del vertedero de medición trapezoidal.



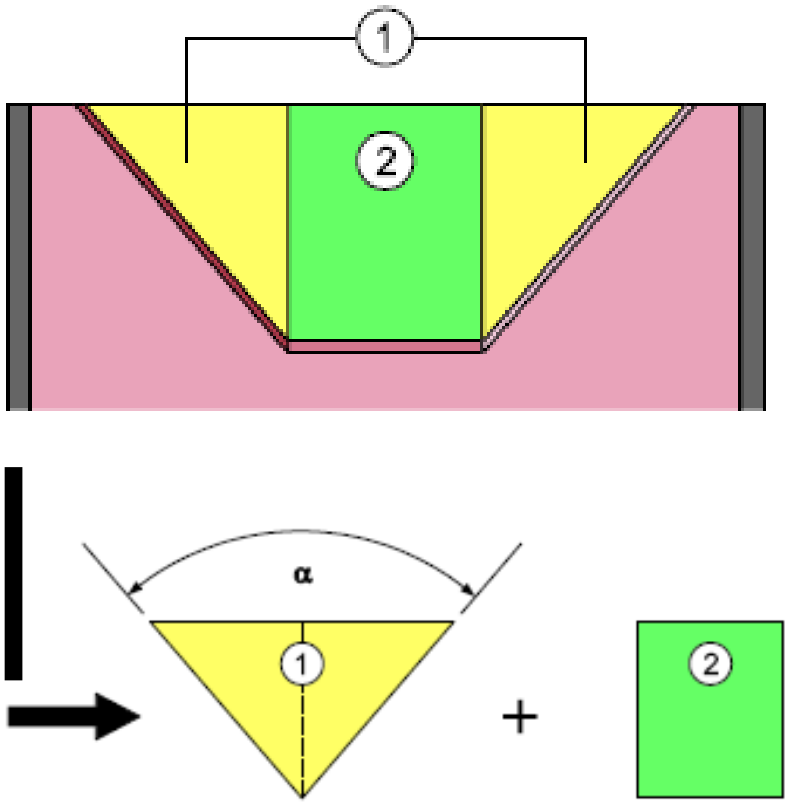
Fuente: Elaboración propia.

La ecuación de vertedero para una presa de medición se obtiene dividiendo el área de la sección transversal trapezoidal en un rectángulo y un triángulo, tal como se observa en la Figura 7.

Sumados las áreas (1) y (2) se obtiene la ecuación de vertedero para la geometría de forma trapezoidal:

Figura 7

Esquema de la sección transversal de vertedero de medición trapezoidal.



Fuente: Fig. 4.25 del Manual del equipo G.U.N.T. HM 160.30.

$$Q_1 = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{2.5}$$

$$Q_2 = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b_w \cdot h^{1.5}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{1.5} \left[b_w + \frac{4}{5} \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right]$$

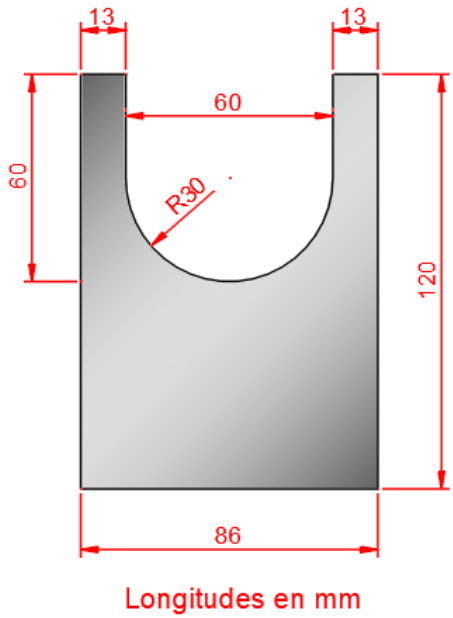
VERTEDERO DE MEDICIÓN SEMICIRCULAR

Este tipo de vertedero contará con un diseño de la mitad de un círculo, acotando que su diseño será diferente de los otros ya que su forma implica usar otro tipo de altura.

En la Figura 8 se observa las dimensiones de la placa de montaje del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal para medición de caudales en el canal de ensayo de pendiente variable.

Figura 8

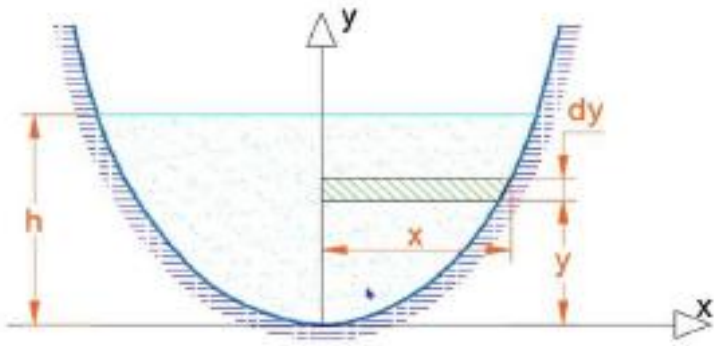
Dimensiones del vertedero de medición semicircular.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9

Esquema de la sección transversal de vertedero de medición semicircular.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia., por Navarro Escobar (2023).

Para la medición del caudal en un vertedero con sección semicircular, se utiliza la siguiente ecuación:

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

Donde:

Q = caudal real

D = diámetro del vertedero

H = altura del nivel de agua

2.2.3 La dinámica de fluidos computacional (CFD).

El estudio de la dinámica de fluidos se origina del interés por encontrar soluciones a los modelos matemáticos de los comportamientos físico-dinámicos de los fluidos, utilizando el poder computacional para realizar cálculos diferenciales y modelación gráfica tridimensional del modelo analítico o de un modelo físico (Díaz Alarcón, 2020).

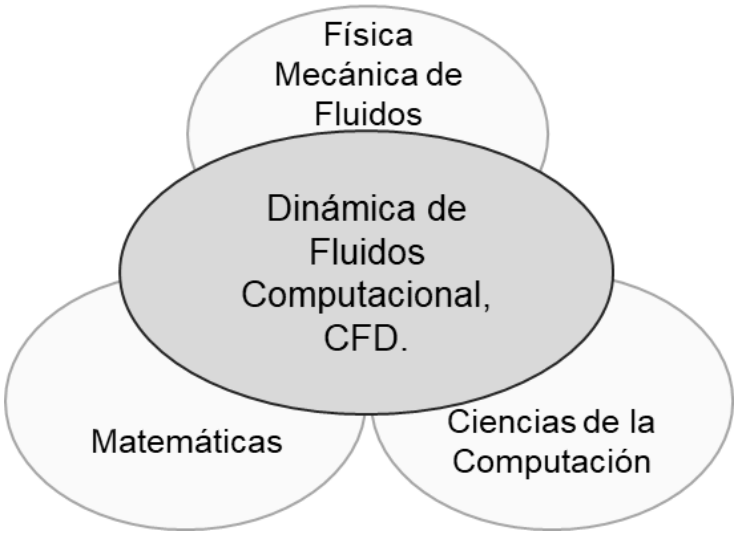
Los modelos matemáticos que se emplean para representar los fenómenos físico-dinámicos de los fluidos no generan expresiones analíticas, ya que son ecuaciones diferenciales en las que participan diversas variables.

Estos modelos matemáticos deben resolverse a través de algoritmos que necesitan una gran cantidad de iteraciones para alcanzar valores que cumplan de manera significativa con las variables incluidas (Díaz Alarcón, 2020).

Los programas CFD, algunos como ANSYS, OpenFOAM, Flow-3D, Autodesk CFD han hecho posible modelar una diversidad de fenómenos en los que están involucrados el estudio del régimen de fluidos, así como la interacción agua-sólidos, la interacción fluido-fluido para casos con fluidos de distintos tipos, las simulaciones termodinámicas de fluidos, las simulaciones de conducción eléctrica y las simulaciones de combustión, entre otras. (Díaz Alarcón, 2020).

Figura 10

Diagrama de la dinámica de fluidos computacional.



Fuente: Figura 6-1, de la tesis de Díaz Alarcón (2020).

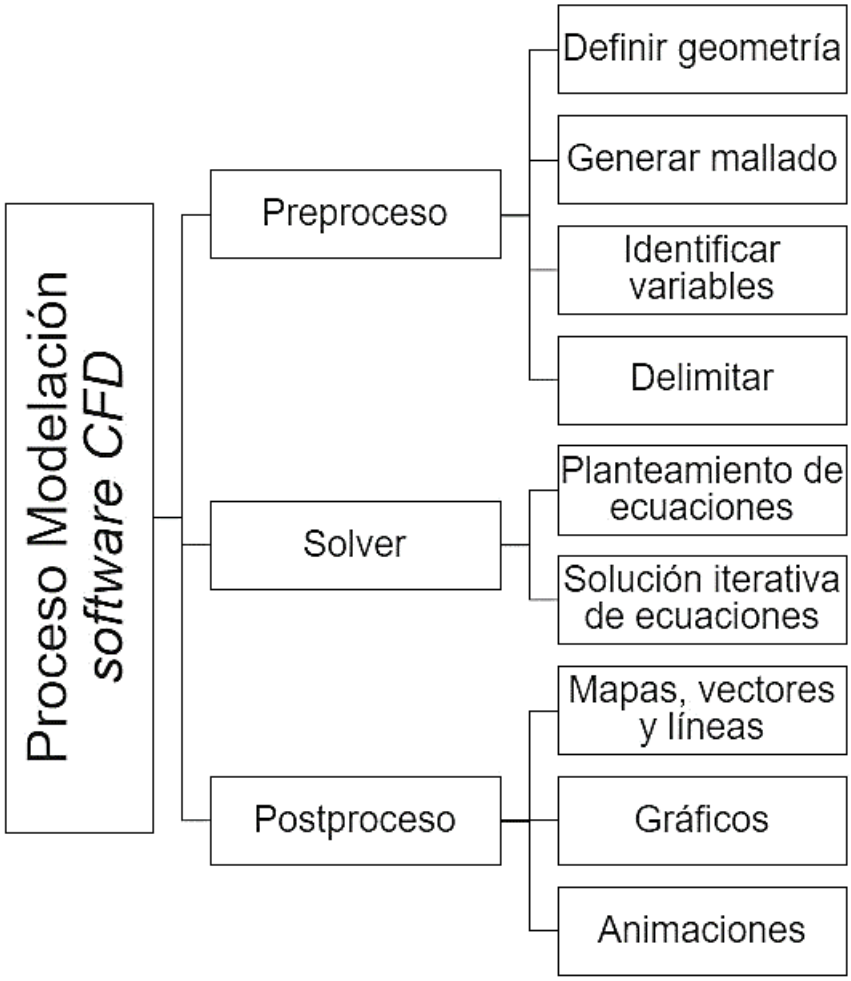
El desarrollo de un modelo con técnicas CFD es un proceso general y sistemático que se divide en tres etapas como se muestra en la Figura 11. La primera es el "preproceso", y se refiere a la etapa inicial de la modelación CFD. En esta etapa se definen las condiciones de frontera que tendrá la modelación, incluyendo la geometría de los sólidos mediante malla, las variables a analizar y los límites del montaje, como el espacio temporal.

La segunda etapa es el "solver", que se refiere al planteamiento de ecuaciones para resolver el modelo numérico a través de repetición de ecuaciones o solución iterativa hasta llegar al resultado en un determinado tiempo de solución.

La última etapa es el "postproceso", y se refiere a la presentación de los resultados en tablas o gráficos en función del tiempo y de acuerdo a las variables definidas.

Figura 11

Diagrama de procesos para modelación CFD.



Fuente: Figura 6-3, de la tesis de Díaz Alarcón (2020).

MÉTODO DEL VOLUMEN FINITO.

Uno de los principales problemas en la comprensión de la física macroscópica, es la generación de modelos matemáticos para sistemas complejos que tienen características continuas, para lo cual, se hace necesario convertir esos sistemas continuos en espacios discretos.

La discretización de elementos permite realizar una aproximación a la modelación matemática de los comportamientos físicos que se quieren analizar. En otras palabras, el método de elementos finitos permite dividir un sistema que esté compuesto por elementos de tendencia infinita en un elemento con fracciones contables, o finitas (Díaz Alarcón, 2020).

Es indispensable tener en cuenta que existe una relación directamente proporcional entre la cantidad de volúmenes de control y la cantidad de recursos de computación necesarios para desarrollar una modelación.

Por otra parte, la cantidad de volúmenes de control generados para el modelo influyen en la calidad de los resultados. Las modelaciones con pocos volúmenes de control pueden generar márgenes altos de error en los resultados de las modelaciones. Los modelos con altas densidades de volúmenes finitos necesitan un alto poder de cómputo o pueden ser demasiado lentos en su solución (Díaz Alarcón, 2020).

Para la modelación de fluidos, entre otros, es necesario establecer condiciones de borde o de frontera para los elementos que componen el sólido con el que interactuará dicho fluido. Esto ayuda a establecer el punto de partida de las ecuaciones que gobiernan el modelo. En general, se puede establecer, como mínimo para este tipo de modelaciones las condiciones de frontera:

- *Inlet:* elemento de partida de donde empieza a fluir el sólido o líquido a analizar. En esta condición de frontera se puede establecer, por ejemplo, el caudal o velocidad de entrada.
- *Outlet:* condición de frontera establece el punto de salida, si así lo requiere la modelación.
- *Wall:* Elementos sólidos con los que interactúa el fluido.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

❖ Canal de ensayo 86x300 mm HM 160.

“Sección rectangular compuesto de un suelo de acero inoxidable y paredes laterales hechos de vidrio templado, resistente y rígido a deformaciones, sobre el cual se podrá controlar la descarga del canal con la colocación de vertederos de pared delgada” (G.U.N.T., 2015b).

❖ Caudal.

“Cantidad de flujo volumétrico que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo” (Rojas & Cajas, 2023).

- **Coeficiente de gasto de vertedero.**

"Valor adimensional que se utiliza para ajustar la fórmula teórica del caudal (Q) que fluye a través del vertedero, y que tiene en cuenta las pérdidas de carga y la contracción del flujo" (Marbello Pérez, 2005).

- **Dinámica de fluidos computacional.**

"Rama de la Mecánica de Fluidos que nace a raíz de la búsqueda de soluciones de los modelamientos matemáticos, apoyados en el poder de cálculo computacional, de los comportamientos físico dinámicos de los fluidos" (Díaz Alarcón, 2020).

- **Modelo numérico**

"Representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento" (Díaz Alarcón, 2020).

- **Napa libre**

"Nivel superior del flujo de un líquido cuando este pasa por una presa o vertedero y se despega del dorso del vertedero, formándose un colchón de aire a presión ambiente en la parte inferior del borde del vertedero" (Rojas & Cajas, 2023).

- **Pendiente longitudinal**

"Es la relación entre la distancia horizontal entre dos puntos dividido entre la altura vertical" (Rojas & Cajas, 2023).

- **Profundidad de flujo**

"Distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, es decir, la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua" (Mejía, 2013).

- **Vertedero de pared delgada**

"Dique o pared que presenta una escotadura de forma regular, a través de la cual fluye una corriente líquida" (Marbello Pérez, 2005).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS UTILIZADAS.

La metodología de esta investigación siguió la ruta cuantitativa en función de la recolección de datos que se muestra en este capítulo.

Se desarrolló en el Laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Universidad Nacional de Ucayali. La universidad está situada en el km. 6.2 de la carretera Federico Basadre (en adelante, C.F.B.), ubicada en la ciudad de Pucallpa, distrito de Callería, provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali.

Ubicación:

DIRECCIÓN : Av. Túpac Amaru km. 6

LUGAR : Universidad Nacional de Ucayali

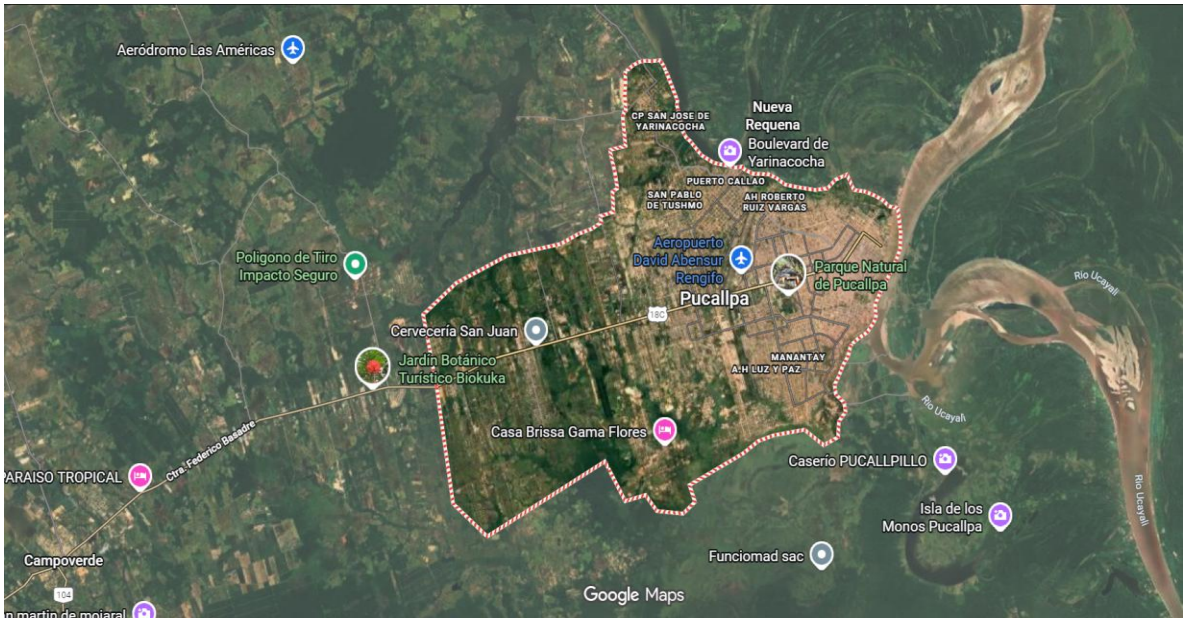
DISTRITO : Callería

PROVINCIA : Coronel Portillo

DEPARTAMENTO : Ucayali

Figura 12

Vista satelital de la zona de estudio.



Fuente: Google Earth, 2025.

3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El tipo de investigación del presente estudio es aplicado, bajo un enfoque cuantitativo, ya que se utilizaron resultados numéricos de los ensayos experimentales de laboratorio para determinar los coeficientes de gasto de vertederos tipo trapezoidal y semicircular.

Según Hernández y Mendoza (2023), plantear un estudio con enfoque cuantitativo implica un rango amplio de propósitos, tales como “explorar y describir fenómenos, variables, hechos, etc.; establecer precedentes; comparar casos, grupos, fenómenos, etc.; relacionar fenómenos; determinar causas y efectos; evaluar intervenciones; desarrollar tecnología; resolver problemas” (p. 41).

3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.

El nivel de la investigación es descriptivo-exploratorio de laboratorio, porque se aborda la caracterización de un fenómeno bajo las leyes conocidas de la mecánica de fluidos y las teorías y herramientas computacionales de simulación dinámica de fluidos (CFD), se apoya de los métodos estadísticos para el análisis y evaluación en el diseño experimental del coeficiente de gasto en los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal de ensayo rectangular de la Universidad Nacional de Ucayali.

3.1.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación tuvo un diseño experimental de laboratorio, de corte transversal, ya que se realizó en un determinado momento en el tiempo. Para ello, se utilizó el equipo HM 160 Canal de Ensayo 86x300mm del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali para realizar los ensayos experimentales en laboratorio.

a) Esquema de la investigación.

O_1 ---------- X_1 ---------- M_1

O_2 ---------- X_2 ---------- M_2

Donde:

O: es el objeto de estudio

X: es el tratamiento de la variable independiente (pendiente 1%, 1.5% y 2%)

M: se refiere a la medición de la variable dependiente.

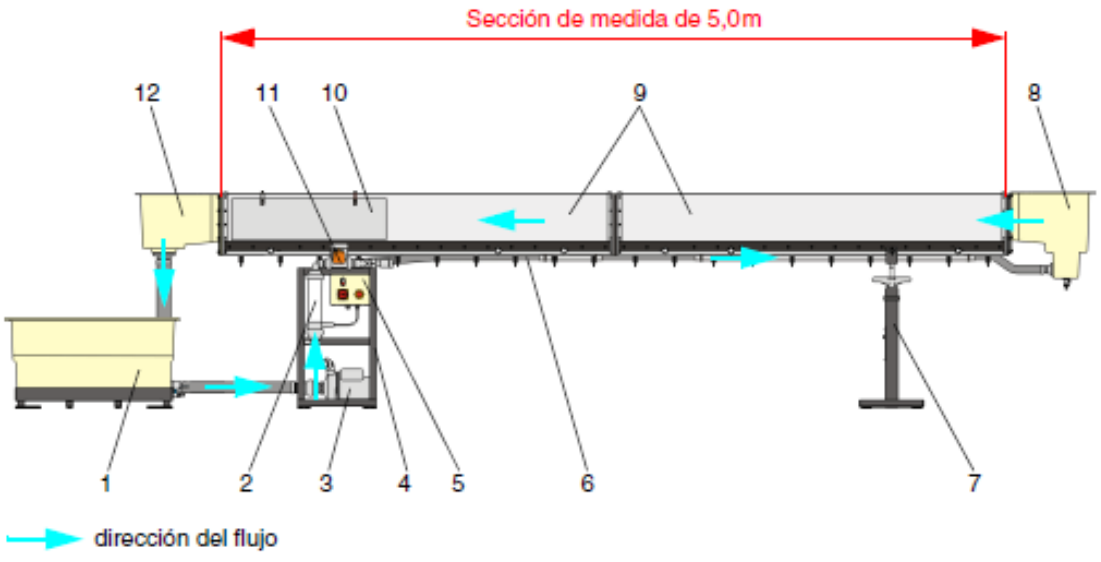
b) Materiales, equipos y herramientas.

Canal de ensayo 86x300 mm HM 160, por G.U.N.T., este equipo es básico en el laboratorio de hidráulica y permite realizar una amplia gama de ensayos experimentales basado en la teoría del flujo por gravedad en canales abiertos.

El equipo que se muestra en la Figura 13 consiste en una estructura con paredes de vidrio templado (9) y fondo de acero inoxidable, montado sobre dos taburetes, uno de montaje fijo (4) y suministro eléctrico y otro de ajuste de la inclinación longitudinal (7) con margen de -1% hasta +3% de inclinación, con una sección de medidas de 8.6 cm de ancho por 30 cm de altura y 5.00 m de longitud, un depósito de agua (1) de aproximadamente 280 L, una bomba centrífuga (3) marca Lowara COM 350 con altura de elevación máxima de 13.7 m y caudal máximo de 22.5 m3/h, caja de distribución y suministro eléctrico (5) de 230V y potencia de 1.2 kW, un caudalímetro (2) tipo rotámetro marca Gemü 807 de diámetro nominal DN 50, útil para medir caudales en un rango de 1 a 10 m3/h, una manguera de conducción (6), un elemento de entrada (8) del caudal al canal de ensayo, un elemento de salida (12) del caudal del canal de ensayo, una placa transparente (10) con trama cuadriculada y una válvula de control (11) del caudal.

Figura 13

Esquema del canal de ensayo HM 160.



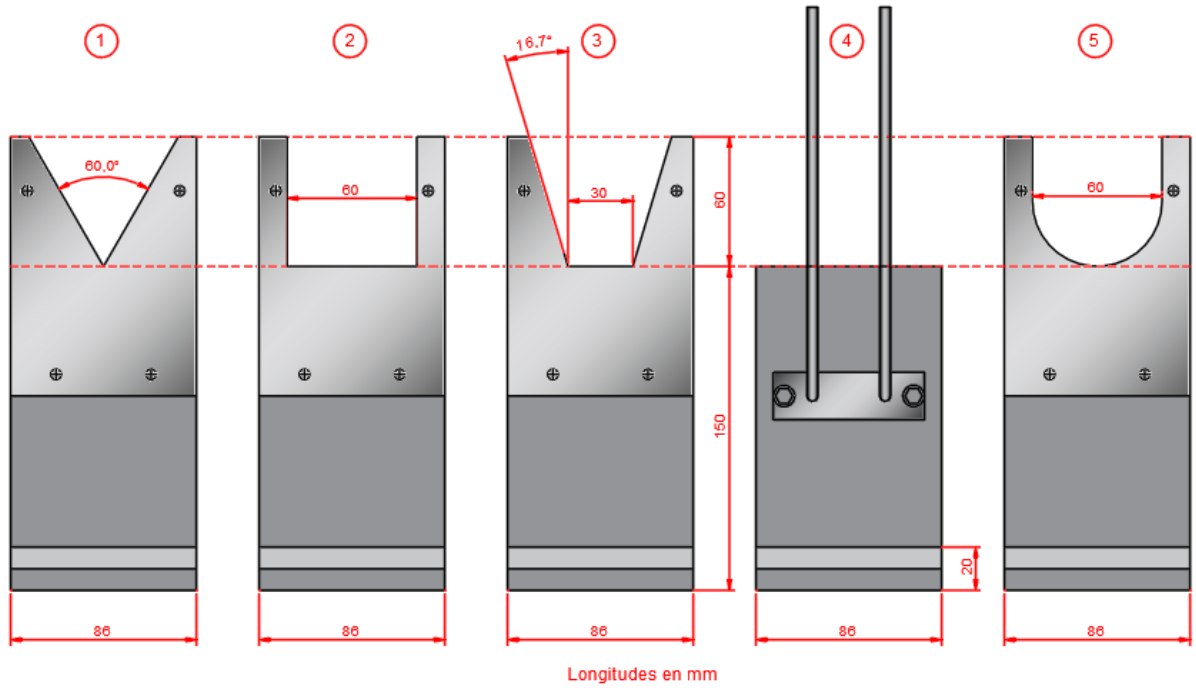
Fuente: Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.

Juego de vertederos de cresta delgada HM 160.30, por G.U.N.T., estos accesorios pueden ser montados en el canal de ensayo HM 160 para realizar la medición del caudal en canales abiertos. En la Figura 14 se observa cinco tipos de presas de pared delgada: de forma rectangular con contracción lateral (2) y sin contracción lateral (4), de forma triangular (1), de forma trapezoidal (3) y de forma semicircular (5).

Para alcanzar los objetivos de la investigación, se fabricó en torno la placa del vertedero semicircular con material acero inoxidable y las mismas características de las placas existentes.

Figura 14

Vista de juego de vertederos de pared delgada.



Fuente: Elaboración propia.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Material de presa : Acero inoxidable

Espesor de placa : 2.0 mm

Diámetro de orificio para montaje : 5 mm

Distancia entre tornillos de montaje en zona inferior de presa : 40 mm

Distancia entre tornillos de montaje en zona superior de presa: 70.5 mm

Cronómetro, para medir el tiempo de duración del flujo en el canal de ensayo, se mide en segundos.

Vernier o pie de rey digital, para medir las dimensiones de los componentes y accesorios de montaje en el canal de ensayo, se mide en milímetros.

Cámara fotográfica, es importante capturar fotografías de los materiales, equipos y procedimiento de los ensayos experimentales en laboratorio. Se puede utilizar la cámara de un celular de alta gama, la cual cumple la misma función de capturar fotografías.

c) Fuentes de datos.

La fuente primaria de datos se refiere a los ensayos experimentales en el canal de ensayo 86x300 mm HM 160.

d) Técnicas de recolección de datos.

La técnica utilizada fue la Observación y el Análisis documental de los ensayos de laboratorio.

e) Instrumento de recolección de datos.

El instrumento utilizado fue la Guía de observación diseñada para recolectar las variables de la unidad de análisis.

Tabla 2

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero … y pendiente s=… %.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m3/h)	Ancho del canal B (m)	Anchura / Diámetro (m)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6					
2	5.5					
3	5					
4	4.5					
5	4					
6	3.5					
7	3					
8	2.5					
9	2					
10	1.5					
11	1					

12	0.5

Fuente: Elaboración propia.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

Navarro Escobar (2024), sostiene que “la población está compuesta por todos los elementos que participan del fenómeno que fue definido y delimitado en el análisis del problema de investigación”.

Pineda Bardalez (2024), señala que “la población hace alusión a la totalidad de ocasiones en las que se manifiesta el fenómeno”.

En este caso, la población del presente estudio está conformada por todos los posibles ensayos en canales rectangulares con vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.

3.2.2. MUESTRA

En este estudio, la muestra estuvo conformada por la cantidad de ensayos experimentales y computacionales en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal de ensayo rectangular de pendiente variable, ya que al abarcar la totalidad de casos posibles durante el funcionamiento del equipo Canal de Ensayo 86x300mm HM 160 en el laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de Sistemas e Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali.

En la Tabla 3 se muestra la muestra y sub muestra de ensayos experimentales de laboratorio, que suman un total de 72 ensayos.

Tabla 3

Tamaño de muestra y sub muestra de ensayos.

Inclinación variable del canal de ensayo	**Vertedero trapezoidal**	**Porcentaje**	**Vertedero semicircular**	**Porcentaje**
Pendiente = 1%	12	16.66%	12	16.66%
Pendiente = 1.5%	12	16.66%	12	16.66%
Pendiente = 2%	12	16.66%	12	16.66%

Sub total	36	50%	36	50%

Fuente: Elaboración propia.

3.3. PROCEDIMIENTOS.

El estudio “Determinación del coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular”, por su diseño, se dividió en dos etapas.

La primera etapa consistió en obtener de manera experimental en laboratorio los coeficientes de gasto de vertederos trapezoidal y semicircular en un canal rectangular con pendiente variable de acuerdo a los tratamientos indicados (1%, 1.5% y 2%), la parte experimental en este tipo de estudios es crucial para analizar el comportamiento real de todos los resultados obtenidos de este fenómeno.

La segunda etapa consistió en validar computacionalmente los coeficientes de gasto de vertederos trapezoidal y semicircular mediante la aplicación de técnicas CFD para lo cual se utilizó el programa ANSYS STUDENT con sus potentes módulos computacionales de simulación.

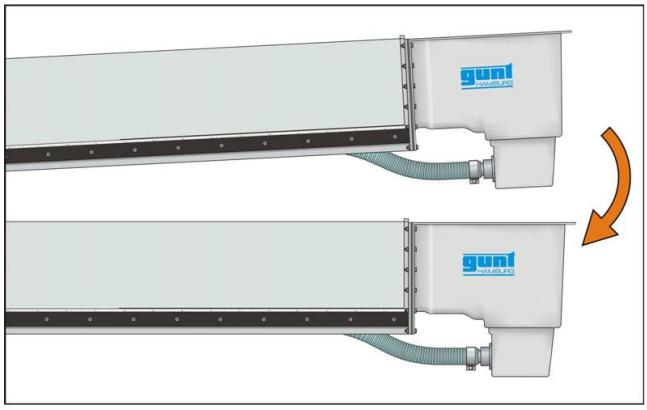
1) PRIMERA ETAPA: Determinación experimental de coeficientes de gasto.

En esta etapa se utilizó el módulo básico del canal de ensayo del laboratorio, el cual contiene un canal hidrodinámico de sección rectangular (86x300 mm), un depósito grande de agua y bomba centrífuga con sistema de abastecimiento para el canal.

Para esto se ajustó la inclinación longitudinal del equipo (Véase Figura 15) a la pendiente deseada.

Figura 15

Ajuste de inclinación longitudinal inicial del canal de ensayo.



Fuente: Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30.

Se asegura que no existan obstáculos u objetos sueltos en la superficie que va recorrer el flujo en el canal.

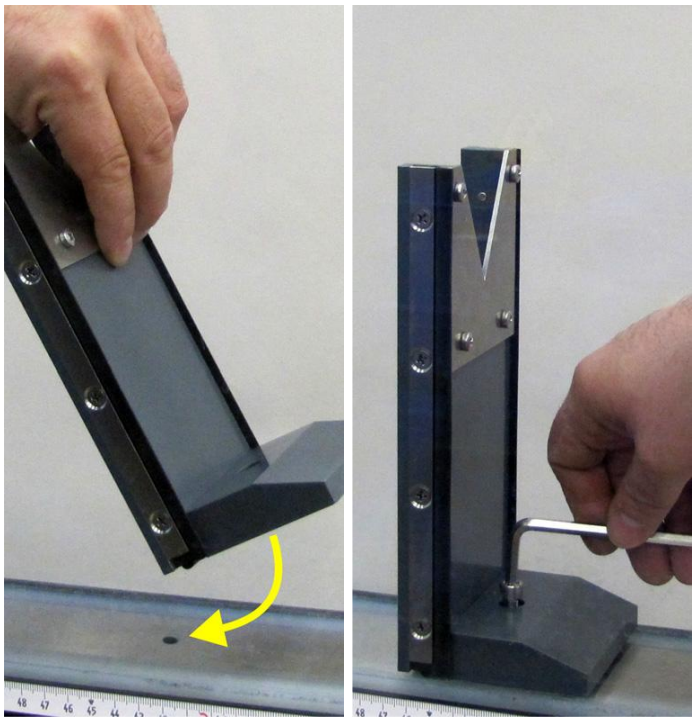
Una vez limpio el recorrido del flujo nos fijamos en el depósito de agua del canal de ensayo, este debe ser llenado con agua limpia, de preferencia agua potable, se puede llenar rápidamente con ayuda de una manguera o con un balde, hasta máximo 5 cm por debajo del borde superior del depósito.

Antes de encender el canal de ensayo se debe elegir la presa para iniciar la medición. Para eso se desatornilla la placa instalada en el cuerpo del vertedero y se atornilla la placa seleccionada en el cuerpo del vertedero.

Una vez atornillado se fija la posición horizontal del vertedero en el canal de ensayo, para esto se recomienda que el tramo del vertedero se instale a una distancia del elemento de entrada de 50 cm como mínimo. Asegúrese de humedecer las caras interiores de las paredes laterales en la zona de colocación del canal de ensayo, también humedezca las juntas de goma de la presa y colocar las juntas de la presa hacia fuera.

Figura 16

Ajuste de presa en sección de medición del canal de ensayo.

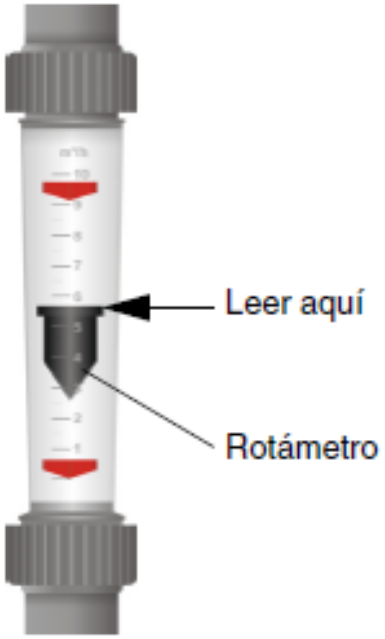


Fuente: Figura 3.4 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30.

Luego de encender el canal de ensayo, se enciende la bomba y se ajusta del caudal inicial de 0.50 m3/h. Para esto es necesario revisar el rotámetro del caudalímetro ubicado en la unidad de bombeo, donde la lectura está dada por la parte superior del rotámetro instalado en el interior del tubo vertical.

Figura 17

Ajuste del caudal del canal de ensayo.



Fuente: Figura 3.28 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30.

Una vez encendido la bomba, el rotámetro empieza a girar y subir hasta quedarse aproximadamente en un mismo nivel. En este paso ajustar el caudal inicial deseado.

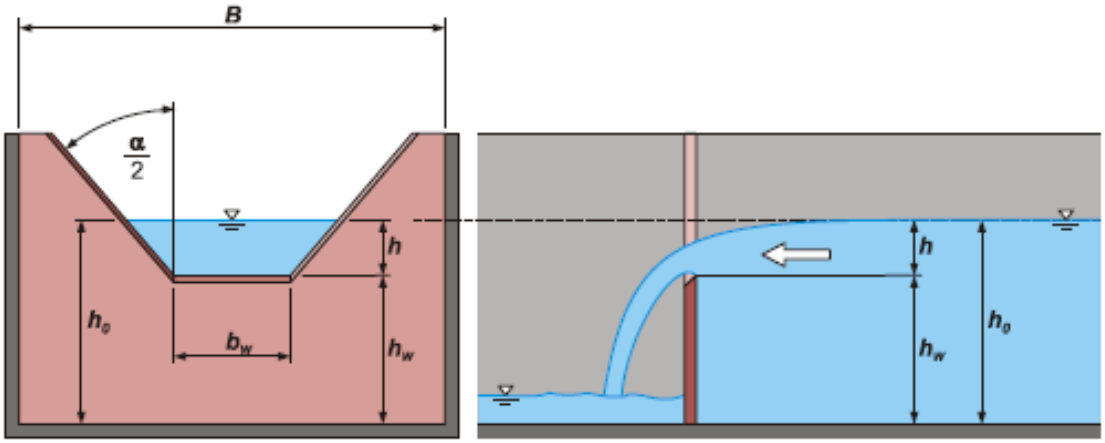
Una vez que el agua comienza a fluir por encima del vertedero, esperar hasta que alcance un estado estable. El elemento de entrada tiene instalado un interruptor de seguridad tipo “flotador”, el cual se activa automáticamente al alcanzar un nivel de agua de 27 cm sobre el fondo de la sección de medida del canal de ensayo, lo cual interrumpe el suministro eléctrico de la bomba y evita que el agua del canal de ensayo rebose.

De igual manera el elemento de salida tiene instalado otro interruptor de seguridad tipo flotador para evitar que el agua del canal de ensayo rebose.

Luego realizar la medición del nivel de aguas arriba del canal de ensayo (ho) como se observa en la Figura 18, donde el ho se determinó a una distancia equivalente a cinco veces la altura del nivel de agua (h) que pasa por encima de la presa.

Figura 18

Medición de nivel de aguas arriba en el canal de ensayo.



Fuente: Figura 4.24 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30.

Para determinar el nivel de agua (h) se realiza un cálculo simple, restando la altura del nivel de aguas arriba (ho) menos la altura de la presa (hw) que se realiza antes del ensayo o también según las especificaciones técnicas de los accesorios.

Una vez obtenido la altura del nivel de agua (h) se multiplica por cinco y se realiza la medición ubicando la regla o instrumento a una distancia horizontal respecto a la presa. La distancia debe ser como mínimo el triple de la altura (h).

Anotar los datos recolectados en la guía de observación. Posteriormente debe aumentar el caudal de manera gradual de acuerdo a la Tabla 4, y repetir la medición de acuerdo a la Figura 18.

Tabla 4

Valores de magnitud de los pasos del caudalímetro en m3/h.

Tipo de presa	Paso
Vertedero trapezoidal	0.25 … 0.50 m3/h [a]
Vertedero semicircular	0.50 m3/h

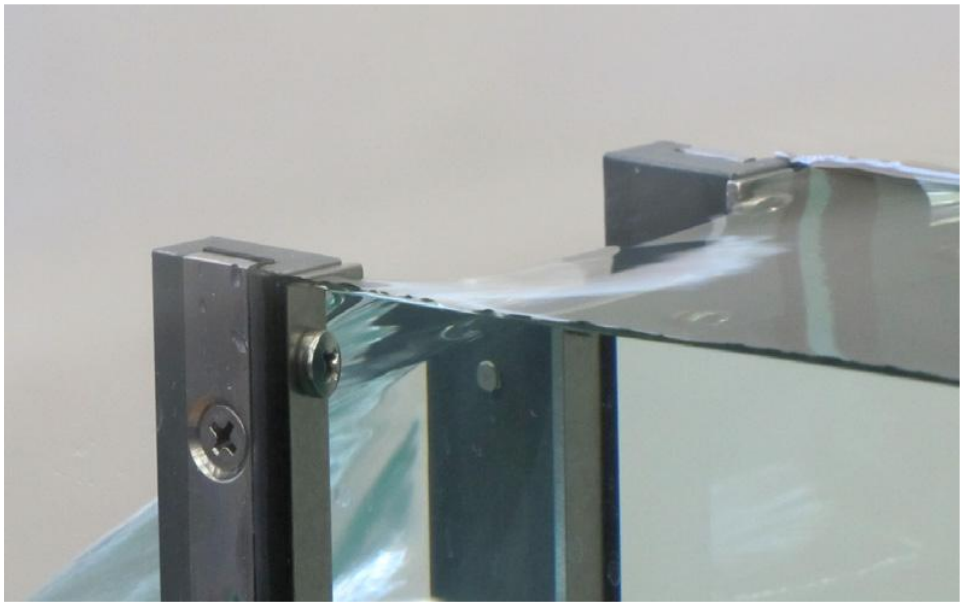
Nota. [a]: Tabla 5.1 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30. Fuente: Elaboración propia.

En las presas que tienen contracción lateral, la medición se da por concluida cuando el agua alcanza el borde superior de la presa como se observa en la Figura 19. Esto se observa en los vertederos trapezoidal y semicircular cuando el agua alcanzó el borde superior de la presa con un caudal de 6 m3/h en el caudalímetro.

No se debe realizar mediciones por encima de ese rango ya que el agua pasa por encima de las paredes laterales de la presa, esto invalida la aplicación de la ecuación del caudal teórico de vertedero.

Figura 19

Límite de medición de caudal en canal de ensayo con vertedero.



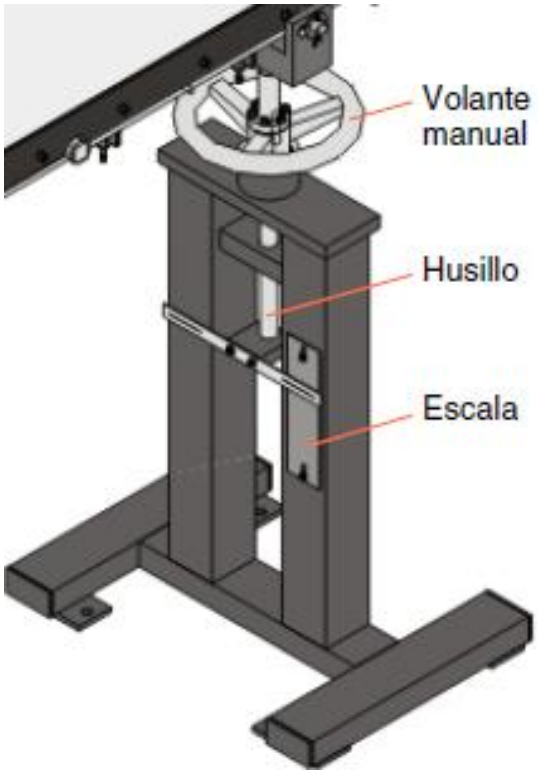
Fuente: Figura 5.8 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.30.

Una vez terminada la medición del caudal se apaga el interruptor de la bomba.

Se ajusta el caudal nuevamente hasta el valor de caudal inicial y se ajusta la inclinación longitudinal del canal de ensayo con el volante manual que consiste en un mecanismo elevador de husillo colocado en el cojinete de apoyo del canal de ensayo y una escala de medición de la pendiente longitudinal del canal de ensayo en un rango desde -1% al +3%. (Ver Figura 20)

Figura 20

Ajuste de la inclinación del canal de ensayo.



Fuente: Figura 3.37 del Manual de experimentos G.U.N.T. HM 160.

Una vez terminada la medición del caudal con los tres tratamientos de la pendiente longitudinal del canal de ensayo (1%, 1.5% y 2%) se apaga el interruptor de la bomba y se retira la presa del canal de ensayo para cambiar la placa metálica por la placa seleccionada.

Se realiza el mismo procedimiento para el ensayo de medición de caudal con el vertedero semicircular.

Al finalizar todos los ensayos experimentales apagar el interruptor de la bomba.

Retirar todos los accesorios del canal de ensayo, la presa y las juntas, secar con un paño suave.

Una vez que todo el agua del canal fluye al depósito de agua, apagar el interruptor principal.

Finalmente, desconectar el canal de ensayo del suministro eléctrico.

Los instrumentos deben ser correctamente llenados para su posterior procesamiento y comparación de datos.

2) SEGUNDA ETAPA: Análisis de simulación CFD.

Para el análisis del modelo hidráulico con herramientas computacionales, se escogió el software ANSYS ACADEMIC STUDENT 2025 R2, por Ansys Inc., este consiste en un paquete de potentes herramientas de modelación y análisis de estructuras hidráulicas y flujos de agua, desarrollado por la compañía estadounidense ANSYS. Este software facilita el procesamiento análisis y modelación de casos complejos de ingeniería hidráulica, lo que permite lograr satisfactoriamente la obtención de gastos hídricos a través de sus módulos computacionales.

En 2018, se publicó un estudio en la Universidad Politécnica de Valencia de España, donde informa que el ingeniero Ngamalieu Nengoue realizó una investigación, en 2015, sobre vertederos hidráulicos aplicando técnicas de simulación computacional de fluidos, en ambos casos obtuvo resultados satisfactorios mediante la utilización de estas herramientas computacionales, señalando que pudo realizar con éxito la simulación del flujo, las condiciones de dominio, la geometría y el modelo hidráulico, tal como se desarrollaría de manera física en un laboratorio.

En 2017, otro estudio publicado en la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, informa que los ingenieros Eduardo E. Salazar Campoverde y Manuel R. Cedillo Chica realizaron una investigación sobre métodos matemáticos y simulación numérica en ingeniería. Ellos buscaban validar computacionalmente vertederos simétricos de forma triangular y rectangular para generar un nuevo modelo asimétrico. Los resultados muestran que no solo es posible reproducir el régimen del flujo para el modelo hidráulico, además permite obtener los caudales de gasto y generar modelos de vertederos que pueden ser validados computacionalmente.

En ambos casos, los estudios aplicaron técnicas de modelación CFD utilizando el software Ansys, que está disponible en el mercado y ofrece un paquete de múltiples herramientas para solucionar los problemas que se presentan en el campo de la ingeniería hidráulica.

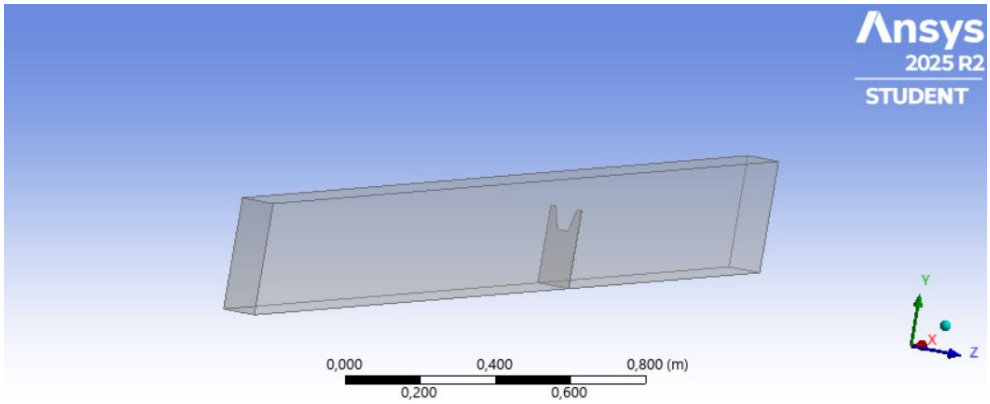
Todo los procesos y análisis mediante CFD pasan por 4 etapas: primero, se define la geometría del cuerpo, después se registra las propiedades del vertedero, luego se define los límites también llamado frontera del modelo de simulación, después se indica las fórmulas de cálculo según el modelo de resolución y finalmente analizar y procesar los datos numéricos obtenidos.

2.1) GEOMETRÍA DEL MODELO

La geometría del modelo está definida por el dominio del espacio ocupado por el canal de ensayo y la sección del vertedero de pared delgada. Se utilizó el modelo del canal de ensayo con sus dimensiones 86 mm de ancho y 300 mm de alto, y las formas geométricas de los vertederos de forma trapezoidal y semicircular con una altura de cresta de 150 mm.

Figura 21

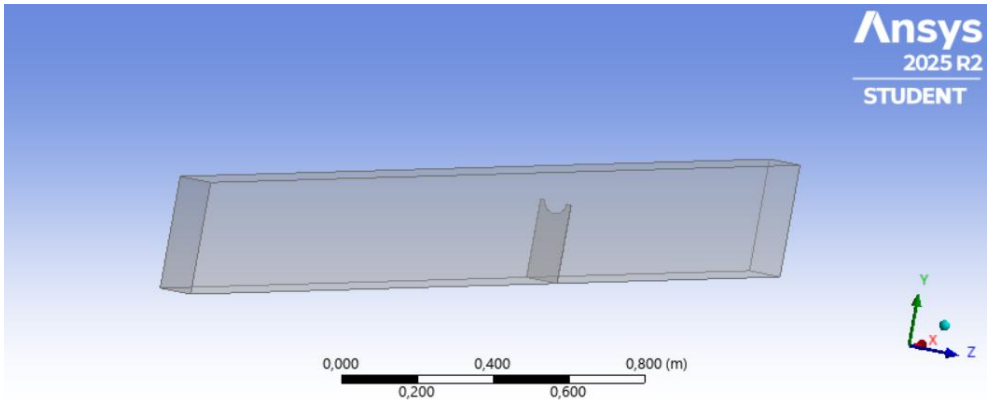
Geometría de canal rectangular y vertedero trapezoidal con modelación CFD.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

Figura 22

Geometría de canal rectangular y vertedero semicircular con modelación CFD.



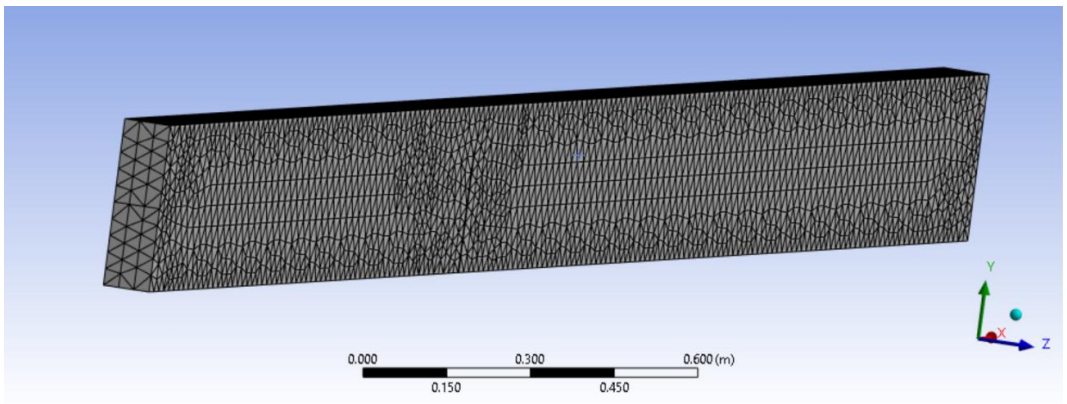
Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

2.2) GENERACIÓN DE LA MALLA Y DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES LÍMITES

Para generar las condiciones de la malla, se debió elegir cuidadosamente el tipo de malla de acuerdo a la forma y geometría del canal de ensayo y vertedero. Para la zona del canal y el vertedero, la malla estructurada está conformado por elementos tetraédricos, con un tamaño de elemento pequeño de 0.02 (m), se eligió este tipo de malla para realizar la simulación ya que, a comparación del tipo de malla Multi zona y Hexa dominante, manifiesta menor error relativo al momento de resolver las ecuaciones en vertederos (Salazar y Cedillo, 2017).

Figura 23

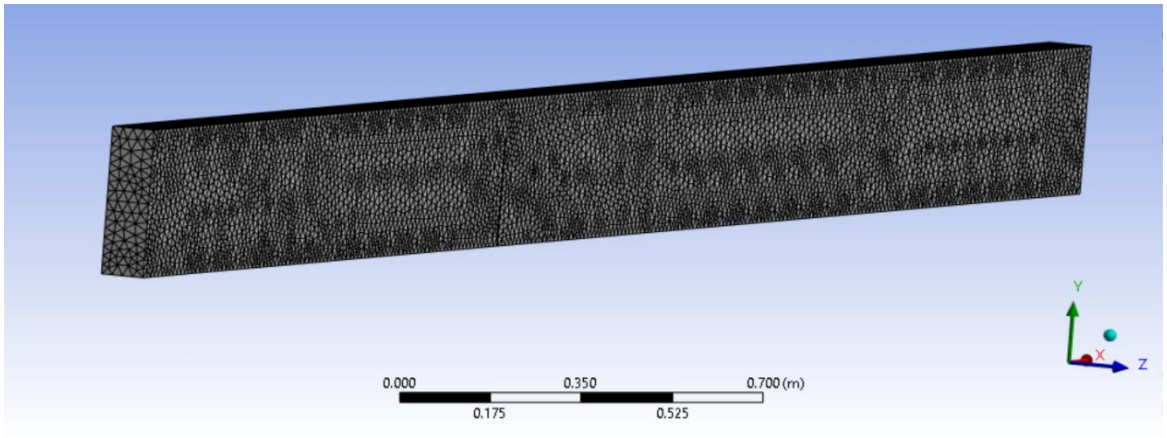
Generación de las condiciones de malla tetraédrica en vertedero trapezoidal.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

Figura 24

Generación de las condiciones de malla tetraédrica en vertedero semicircular.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

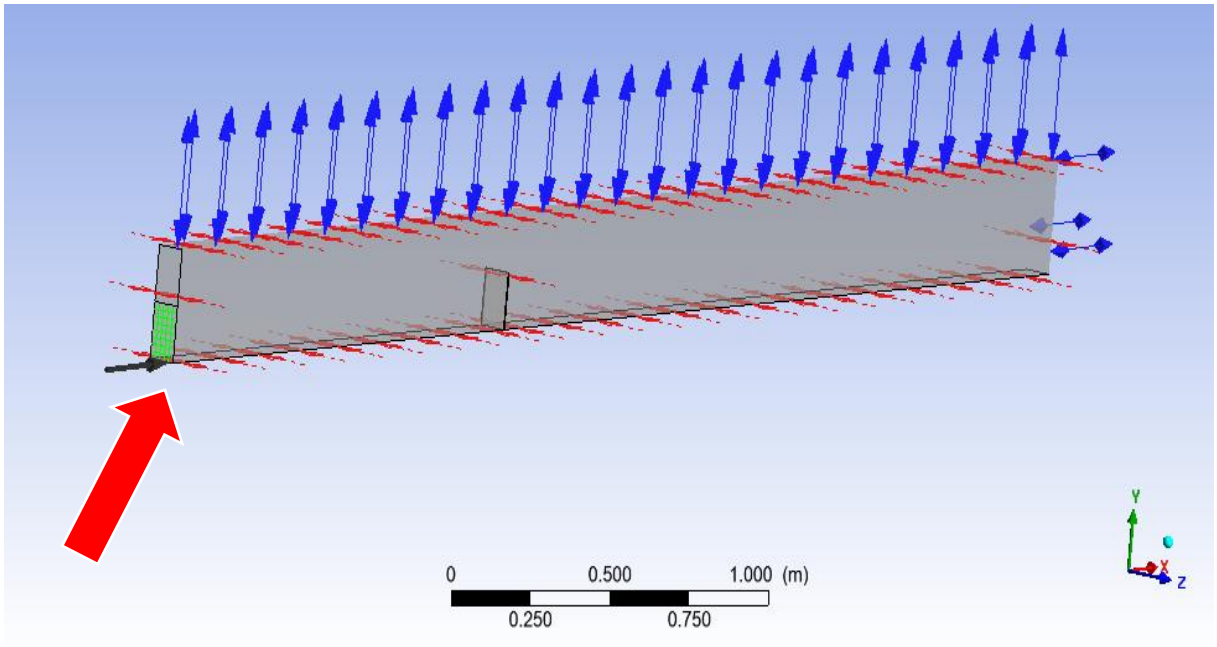
DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES LÍMITES.

Después de crear la geometría y las condiciones de la malla, se determinan los materiales que se examinarán en la simulación, así como sus propiedades: agua y aire a 25 °C con una presión atmosférica de 1 atm. En el modelo, se establece un valor de gravedad de 9.81 m/s² en dirección negativa al eje Y y una densidad referencial de 1.20 Kg/m³. Esta configuración fue adoptada bajo recomendación del Ing. Salazar porque nos ayuda a evitar errores de redondeo en los cálculos y a equilibrar la presión hidrostática dentro del dominio. (Salazar y Cedillo, 2017, p. 35).

Asimismo, se establecieron las condiciones límites del modelo, que son: Inlet (entrada) y outlet (salida), así como las áreas de simetría, se indican y se establece un dominio estacionario para el modelo del flujo, que es considerado como un flujo uniforme con superficie libre (en simulaciones hidráulicas). La región del sistema donde entra el agua se llama entrada (inlet) y la zona por donde sale el agua se llama salida (outlet). Las áreas de simetría nos ayudan a reducir el tiempo de cálculo en el programa.

Figura 25

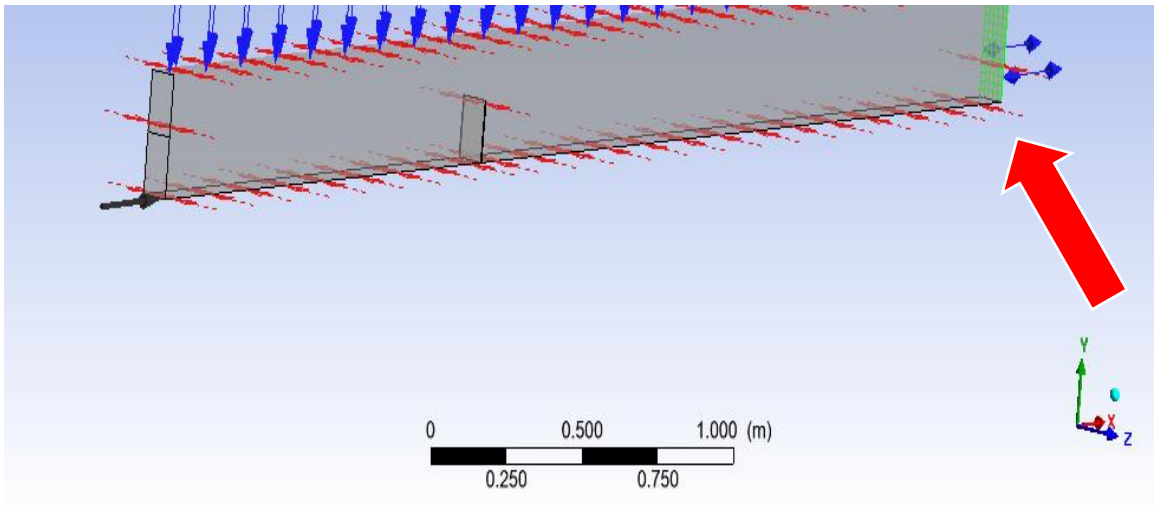
Zona de entrada (inlet) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

Figura 26

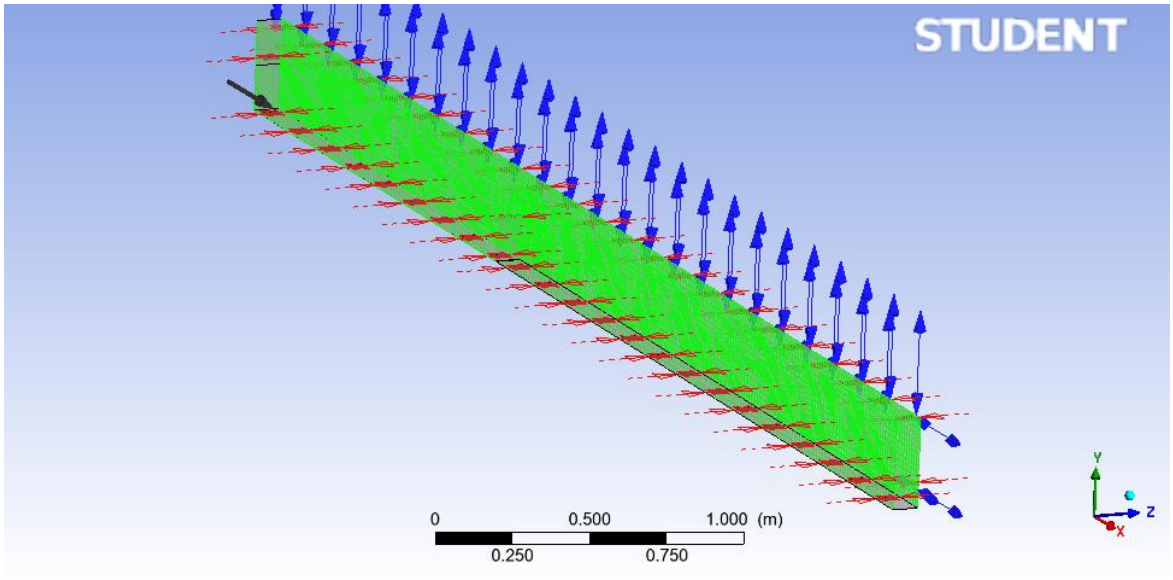
Zona de salida (outlet) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

Figura 27

Zona de simetría (symmetry) en canal y vertedero, aplicando modelación CFD.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

CALIBRACIÓN DEL SOLVER DE CÁLCULO Y RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para avanzar con esta etapa, fue imprescindible entender las ecuaciones que nos posibilitarán una descripción precisa del comportamiento del fluido a través del canal. Para lograr los resultados más cercanos a la calidad, en este estudio se optó por las ecuaciones de un flujo uniforme y el modelo de resolución será muy eficiente.

2.3) RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO POR ITERACIONES.

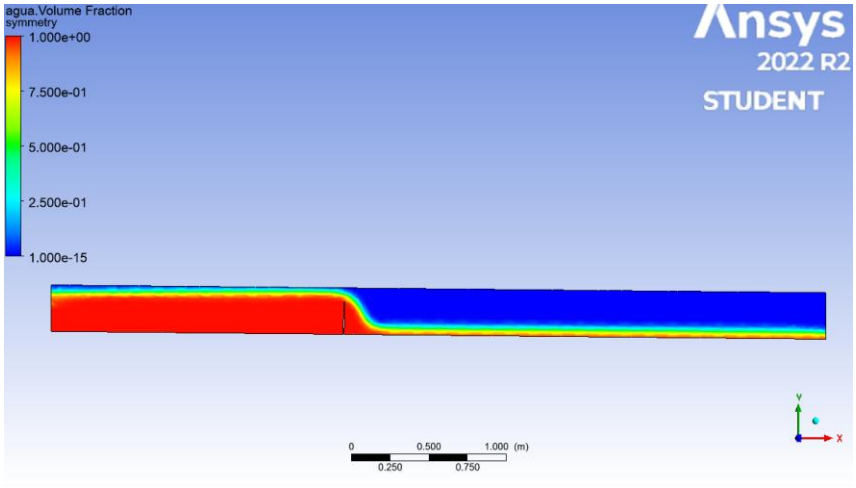
La solución se obtuvo mediante un proceso iterativo hasta que el resultado convergió. Para alcanzar la convergencia, el programa ejecutó hasta 1000 iteraciones. El programa efectuó los cálculos de forma repetitiva hasta que el resultado se estabilizó.

VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO.

En la Figura 28 y Figura 29 se visualiza el comportamiento del flujo en el interior del canal, la fracción de volumen de agua en la sección del vertedero de medición.

Figura 28

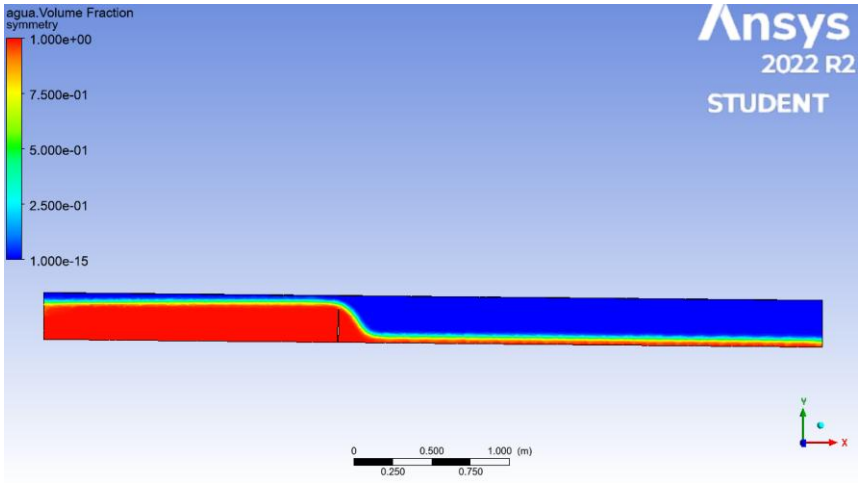
Fracción de volumen de agua sobre el vertedero trapezoidal en canal rectangular.



Fuente: Ansys 2025 R2 Student.

Figura 29

Fracción de volumen de agua sobre el vertedero semicircular en canal rectangular.



Fuente: Ansys Student 2025.

2.4) POST TRATAMIENTO: Procesamiento del modelo numérico

Los datos obtenidos se procesaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel después de ser simulados y visualizados. Se llevó a cabo el análisis y la gestión de estos datos para calcular los coeficientes de gasto en los vertederos: trapezoidal y semicircular.

Por último, se realizó la comparación de los coeficientes de gasto de vertederos trapezoidal y semicircular por experimentación y por simulación, además se determinó el nivel de relación entre las variables del objeto en estudio.

Se elaboraron gráficas y tablas para expresar los resultados obtenidos, evaluando los coeficientes obtenidos por simulación y cotejándolos con los que se obtuvieron en las pruebas experimentales.

CAPITULO IV

PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1. Resultados de la estadística descriptiva

VERTEDERO TRAPEZOIDAL – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 1%

En la Tabla 5 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=1%.

Tabla 5

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=1%.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m3/h)	Ancho del canal B (m)	Abertura α (grados)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6	0.086	16,7°	0.15	0.218	0.068
2	5.5	0.086	16,7°	0.15	0.215	0.065
3	5	0.086	16,7°	0.15	0.213	0.063
4	4.5	0.086	16,7°	0.15	0.209	0.059
5	4	0.086	16,7°	0.15	0.206	0.056
6	3.5	0.086	16,7°	0.15	0.202	0.052
7	3	0.086	16,7°	0.15	0.198	0.048
8	2.5	0.086	16,7°	0.15	0.194	0.044
9	2	0.086	16,7°	0.15	0.189	0.039
10	1.5	0.086	16,7°	0.15	0.183	0.033
11	1	0.086	16,7°	0.15	0.178	0.028
12	0.5	0.086	16,7°	0.15	0.169	0.019

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 1%.

En la Tabla 6 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=1%, obtenido con la fórmula de medición de Cipolletti al sumar los caudales de las áreas triangulares y rectangular que conforma la geometría trapezoidal. (Ver Figura 7)

Tabla 6

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	s (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.0	0.068	1.0	8.73172	0.6871
2	5.5	0.065	1.0	8.03346	0.6846
3	5.0	0.063	1.0	7.58486	0.6592
4	4.5	0.059	1.0	6.72782	0.6689
5	4.0	0.056	1.0	6.11983	0.6536
6	3.5	0.052	1.0	5.35496	0.6536
7	3.0	0.048	1.0	4.64179	0.6463
8	2.5	0.044	1.0	3.97963	0.6282
9	2.0	0.039	1.0	3.22268	0.6206
10	1.5	0.033	1.0	2.41660	0.6207
11	1.0	0.028	1.0	1.82896	0.5468
12	0.5	0.019	1.0	0.96221	0.5196

Fuente: Elaboración propia.

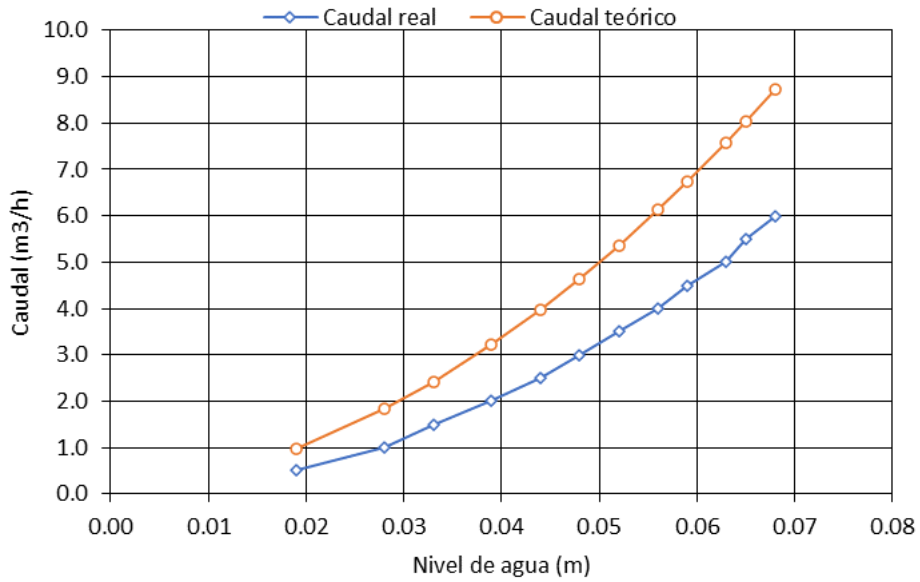
Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del

vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 1%

En la Figura 30 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal y caudal del canal con pendiente s=1%.

Figura 30

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K\,H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $Y = m\,X + b$ ⟹ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 7

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.

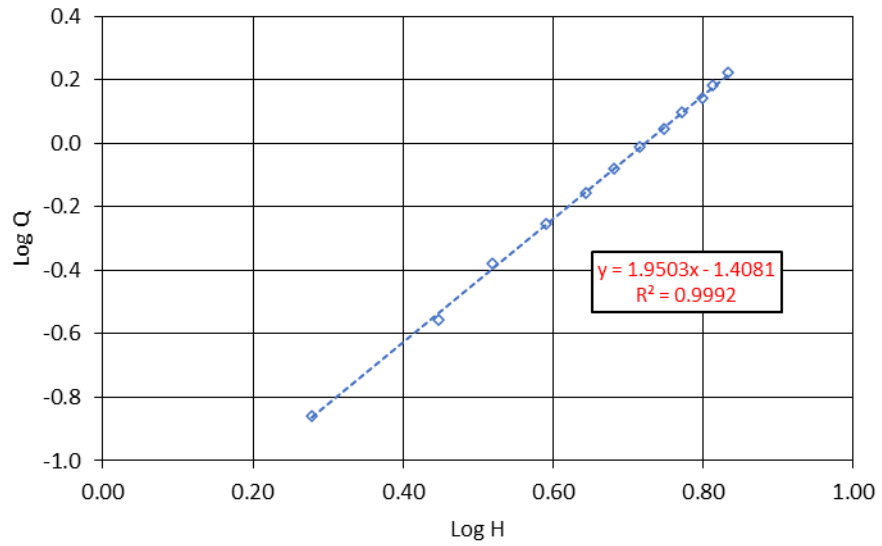
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.068	0.8325	0.2218
2	5.5	0.065	0.8129	0.1841
3	5.0	0.063	0.7993	0.1427
4	4.5	0.059	0.7709	0.0969
5	4.0	0.056	0.7482	0.0458
6	3.5	0.052	0.7160	-0.0122
7	3.0	0.048	0.6812	-0.0792
8	2.5	0.044	0.6435	-0.1584
9	2.0	0.039	0.5911	-0.2553
10	1.5	0.033	0.5185	-0.3802
11	1.0	0.028	0.4472	-0.5563
12	0.5	0.019	0.2788	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 7, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 31 se obtiene el valor **n=1.9503**.

Figura 31

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

$K = \log^{-1} (-1.4081)$

K = 0.039066

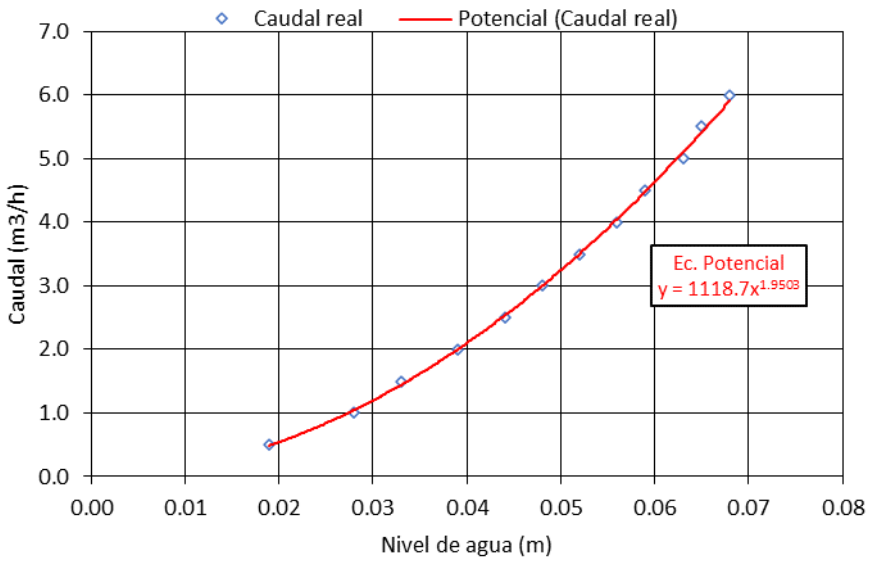
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente s=1%.

$Q = 0.039066\ (H)^{1.9503}$ en L/seg o, $Q = 1118.7\ (H)^{1.9503}$ en m3/h

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 32 la ecuación potencial del caudal y nivel de agua medido en vertedero trapezoidal con pendiente de 1%.

Figura **32**

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: Q = a * Ln (H) + b

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 8

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.

Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.068	-2.69	6.00
2	5.5	0.065	-2.73	5.50
3	5.0	0.063	-2.76	5.00
4	4.5	0.059	-2.83	4.50
5	4.0	0.056	-2.88	4.00
6	3.5	0.052	-2.96	3.50

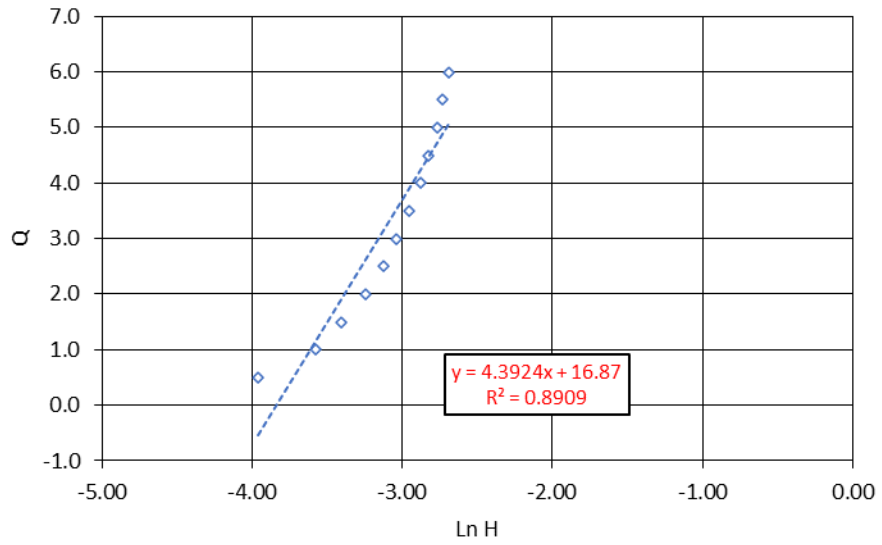
7	3.0	0.048	-3.04	3.00
8	2.5	0.044	-3.12	2.50
9	2.0	0.039	-3.24	2.00
10	1.5	0.033	-3.41	1.50
11	1.0	0.028	-3.58	1.00
12	0.5	0.019	-3.96	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 8, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 33

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.3924

b = 16.87

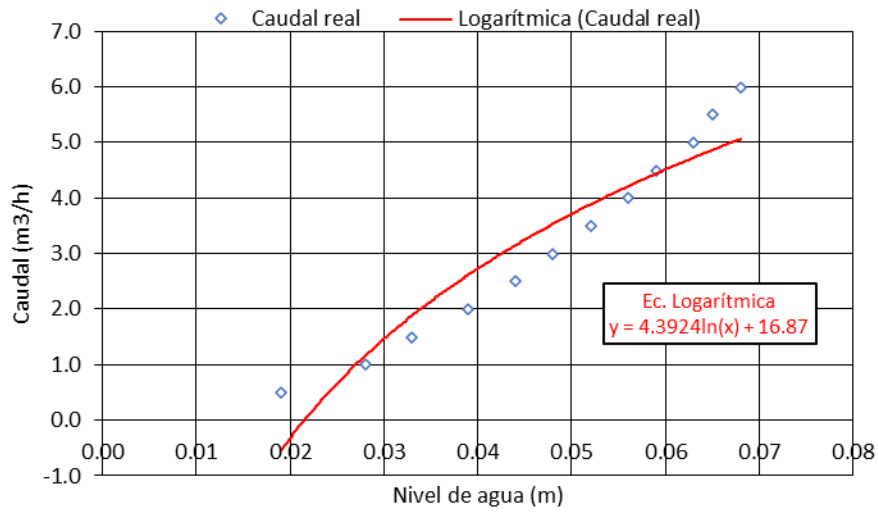
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente s=1%.

Q = 4.3924 * Ln(H) + 16.87

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 34 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente de 1%.

Figura 34

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 9

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.

Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.068	0.068	1.79
2	5.5	0.065	0.065	1.70
3	5.0	0.063	0.063	1.61
4	4.5	0.059	0.059	1.50
5	4.0	0.056	0.056	1.39
6	3.5	0.052	0.052	1.25

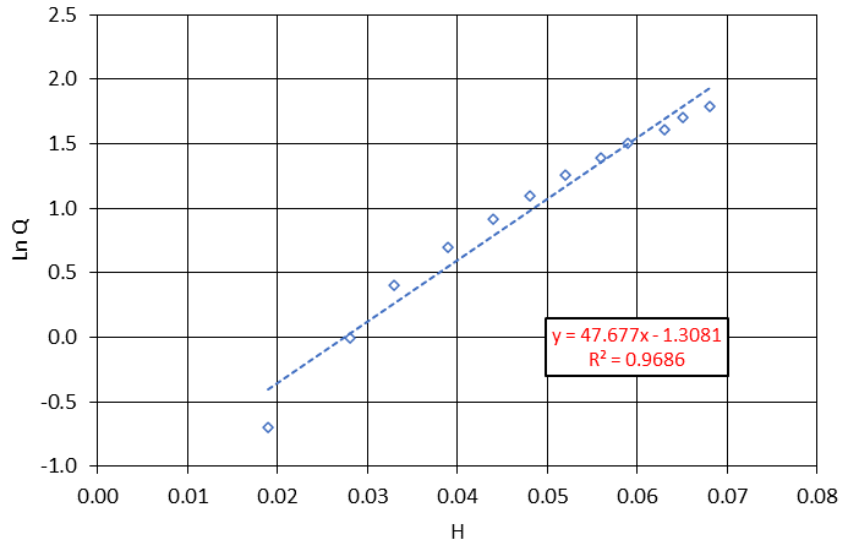
7	3.0	0.048	0.048	1.10
8	2.5	0.044	0.044	0.92
9	2.0	0.039	0.039	0.69
10	1.5	0.033	0.033	0.41
11	1.0	0.028	0.028	0.00
12	0.5	0.019	0.019	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 9, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 35

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 47.677

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -15.6974 / 12$

$c = -1.308119$

$a = e^{c}$

a = 0.2703

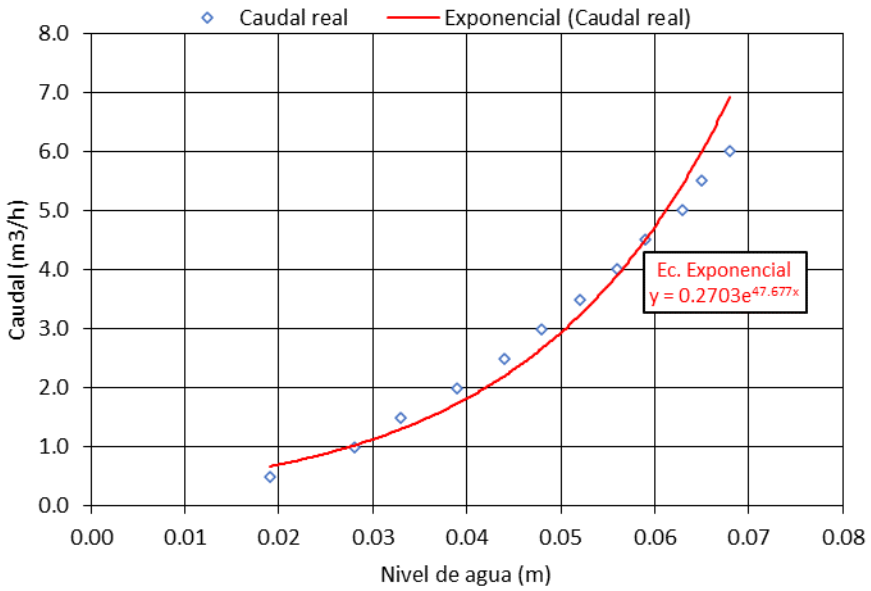
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 1%.

$$Q = 0.2703\ (e)^{47.677\ (H)}$$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 36, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente s=1%.

Figura 36

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde “y” es el caudal y “x” es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 10

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.068	6.00	5.9121	0.0077	7.5625	-
2	0.065	5.50	5.4141	0.0074	5.0625	-
3	0.063	5.00	5.0940	0.0088	3.0625	-
4	0.059	4.50	4.4822	0.0003	1.5625	-
5	0.056	4.00	4.0485	0.0024	0.5625	-
6	0.052	3.50	3.5037	0.0000	0.0625	-
7	0.048	3.00	2.9973	0.0000	0.0625	-
8	0.044	2.50	2.5295	0.0009	0.5625	-
9	0.039	2.00	1.9992	0.0000	1.5625	-
10	0.033	1.50	1.4433	0.0032	3.0625	-
11	0.028	1.00	1.0476	0.0023	5.0625	-
12	0.019	0.50	0.4918	0.0001	7.5625	-
Suma	**0.5740**	**39.0000**	**38.9632**	**0.0330**	**35.7500**	**35.7170**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**2.9384**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0478**	**3.2500**	**3.2469**		**R^2 =**	**0.9991**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 10

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	5.0621	0.8796	7.5625	-	6.9161	0.8392	7.5625	-
2	4.8640	0.4046	5.0625	-	5.9943	0.2444	5.0625	-
3	4.7267	0.0747	3.0625	-	5.4492	0.2017	3.0625	-
4	4.4386	0.0038	1.5625	-	4.5030	0.0000	1.5625	-
5	4.2093	0.0438	0.5625	-	3.9029	0.0094	0.5625	-
6	3.8838	0.1473	0.0625	-	3.2252	0.0755	0.0625	-
7	3.5322	0.2833	0.0625	-	2.6652	0.1121	0.0625	-
8	3.1501	0.4226	0.5625	-	2.2025	0.0885	0.5625	-
9	2.6202	0.3847	1.5625	-	1.7353	0.0700	1.5625	-
10	1.8864	0.1493	3.0625	-	1.3036	0.0386	3.0625	-
11	1.1648	0.0271	5.0625	-	1.0271	0.0007	5.0625	-
12	-0.5385	1.0784	7.5625	-	0.6687	0.0285	7.5625	-
Suma	**38.9997**	**3.8991**	**35.7500**	**31.8509**	**39.5932**	**1.7086**	**35.7500**	**34.0414**
Varianza	**2.6542**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**3.9084**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.2500**		**R^2 =**	**0.8909**	**3.2994**		**R^2 =**	**0.9522**

Fuente: Elaboración propia.

VERTEDERO TRAPEZOIDAL – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 1.5%

En la Tabla 11 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=1.5%.

Tabla 11

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=1.5%.

Ensayo N° Unidad	**Caudal de entrada (m^3/h)**	**Ancho del canal B (m)**	**Abertura α (grados)**	**Altura de presa hw (m)**	**Nivel aguas arriba ho (m)**	**Nivel de agua h (m)**
1	6	0.086	16,7°	0.15	0.217	0.067
2	5.5	0.086	16,7°	0.15	0.214	0.064
3	5	0.086	16,7°	0.15	0.211	0.061
4	4.5	0.086	16,7°	0.15	0.209	0.059
5	4	0.086	16,7°	0.15	0.205	0.055
6	3.5	0.086	16,7°	0.15	0.202	0.052
7	3	0.086	16,7°	0.15	0.198	0.048
8	2.5	0.086	16,7°	0.15	0.194	0.044
9	2	0.086	16,7°	0.15	0.189	0.039
10	1.5	0.086	16,7°	0.15	0.184	0.034
11	1	0.086	16,7°	0.15	0.179	0.029
12	0.5	0.086	16,7°	0.15	0.171	0.021

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 1.5%.

En la Tabla 12 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=1.5%, obtenido con la fórmula de medición de Cipolletti al sumar los caudales de las áreas triangulares y rectangular que conforma la geometría trapezoidal. (Ver Figura 7)

Tabla 12

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	i (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.0	0.067	1,5	8.49557	0.7063
2	5.5	0.064	1,5	7.80748	0.7045
3	5.0	0.061	1,5	7.14968	0.6993
4	4.5	0.059	1,5	6.72782	0.6689
5	4.0	0.055	1,5	5.92372	0.6753
6	3.5	0.052	1,5	5.35496	0.6536
7	3.0	0.048	1,5	4.64179	0.6463
8	2.5	0.044	1,5	3.97963	0.6282
9	2.0	0.039	1,5	3.22268	0.6206
10	1.5	0.034	1,5	2.54327	0.5898
11	1.0	0.029	1,5	1.94041	0.5154
12	0.5	0.021	1,5	1.13359	0.4411

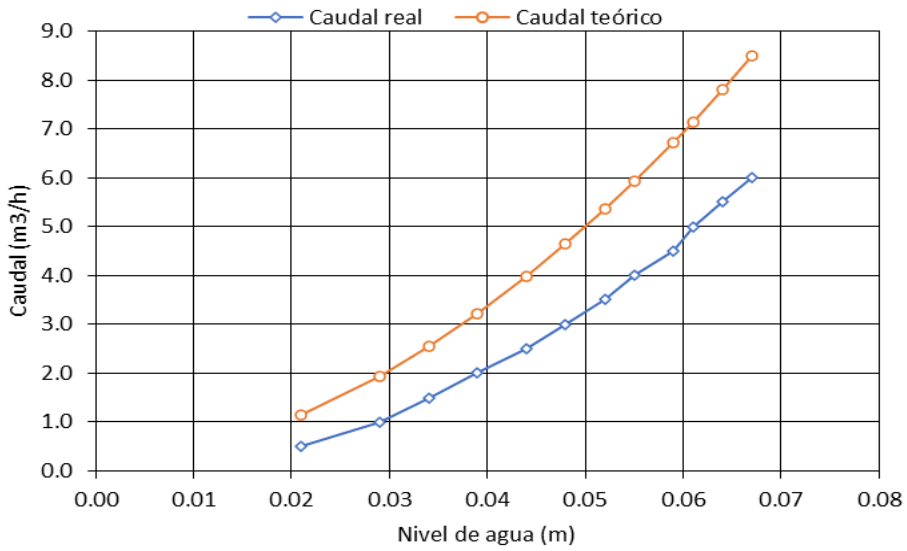
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 1.5%.

En la Figura 37 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal y caudal del canal con pendiente s=1.5%.

Figura 37

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal para pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K\,H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $Y = m\,X + b$ ⟹ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 13

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.

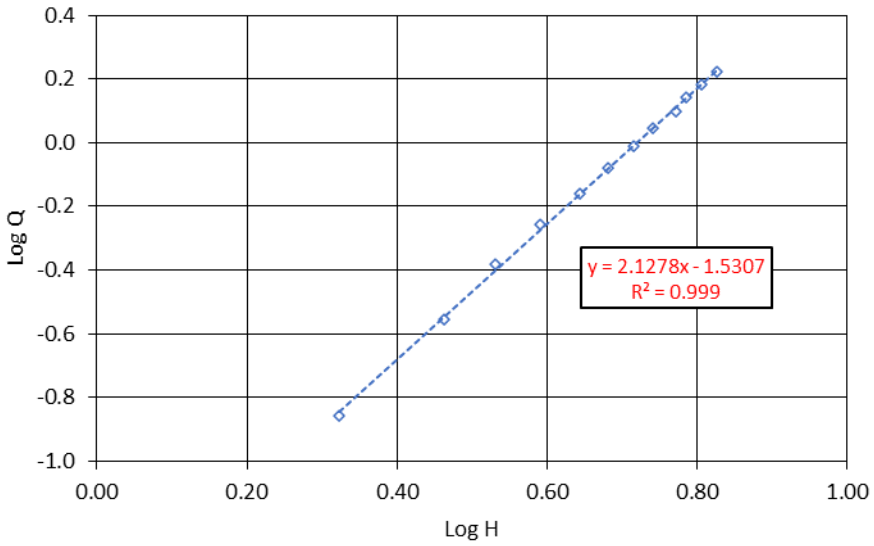
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.067	0.8261	0.2218
2	5.5	0.064	0.8062	0.1841
3	5.0	0.061	0.7853	0.1427
4	4.5	0.059	0.7709	0.0969
5	4.0	0.055	0.7404	0.0458
6	3.5	0.052	0.7160	-0.0122
7	3.0	0.048	0.6812	-0.0792
8	2.5	0.044	0.6435	-0.1584
9	2.0	0.039	0.5911	-0.2553
10	1.5	0.034	0.5315	-0.3802
11	1.0	0.029	0.4624	-0.5563
12	0.5	0.021	0.3222	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 13, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 38 se obtiene el valor **n=2.1278**.

Figura 38

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

$K = \log^{-1}(-1.5306)$

K = 0.029471

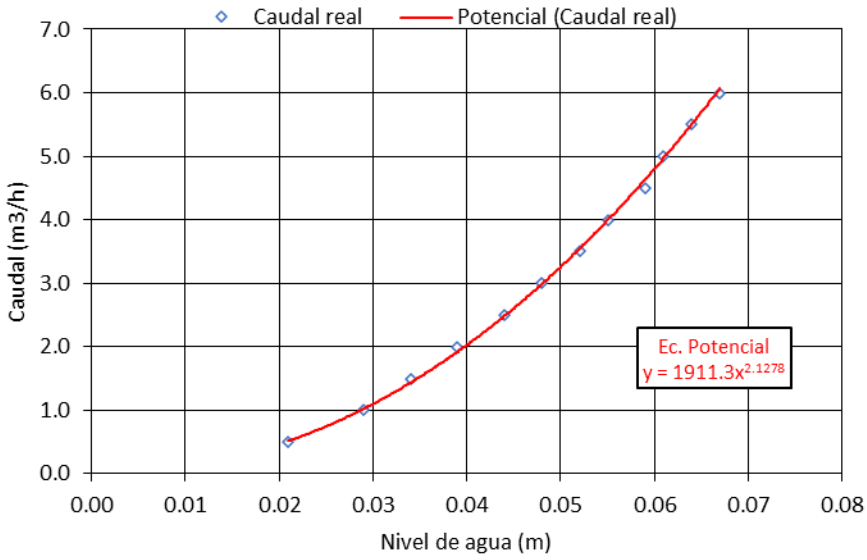
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente s=1.5%.

$Q = 0.029471\ (H)^{2.1278}$ en L/seg o, $Q = 1911.3\ (H)^{2.1278}$, en m3/h

Con los resultados del ensayo se grafica en la Figura 39 la ecuación potencial del caudal y nivel de agua medido en vertedero trapezoidal con pendiente de 1.5%.

Figura 39

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: $Q = a * Ln(H) + b$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 14

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.

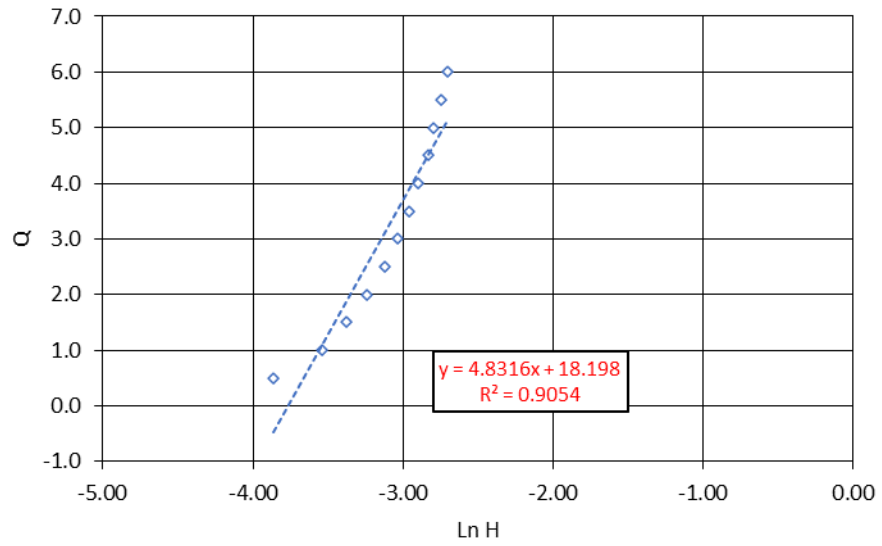
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.067	-2.70	6.00
2	5.5	0.064	-2.75	5.50
3	5.0	0.061	-2.80	5.00
4	4.5	0.059	-2.83	4.50
5	4.0	0.055	-2.90	4.00
6	3.5	0.052	-2.96	3.50
7	3.0	0.048	-3.04	3.00
8	2.5	0.044	-3.12	2.50
9	2.0	0.039	-3.24	2.00
10	1.5	0.034	-3.38	1.50
11	1.0	0.029	-3.54	1.00
12	0.5	0.021	-3.86	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 14, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 40

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.8316

b = 18.198

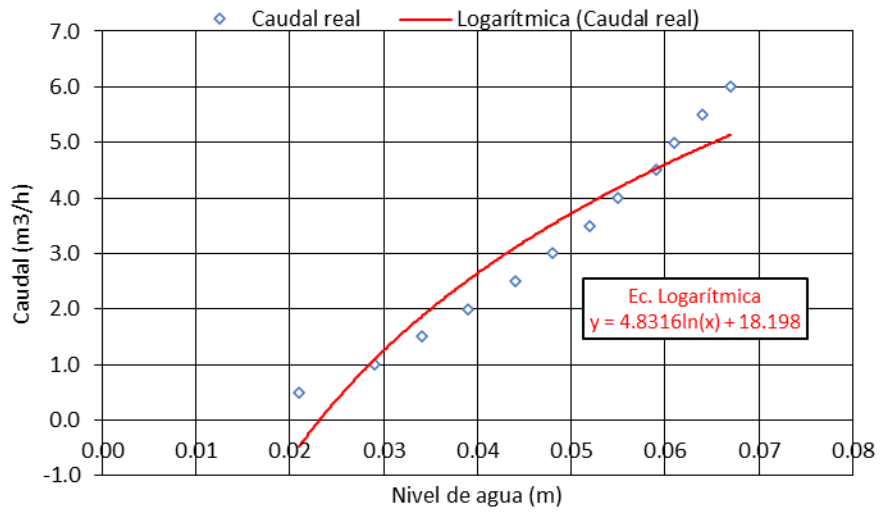
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente s=1.5%.

Q = 4.8316 * Ln(H) + 18.198

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 41 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente de 1.5%.

Figura 41

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 15

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.

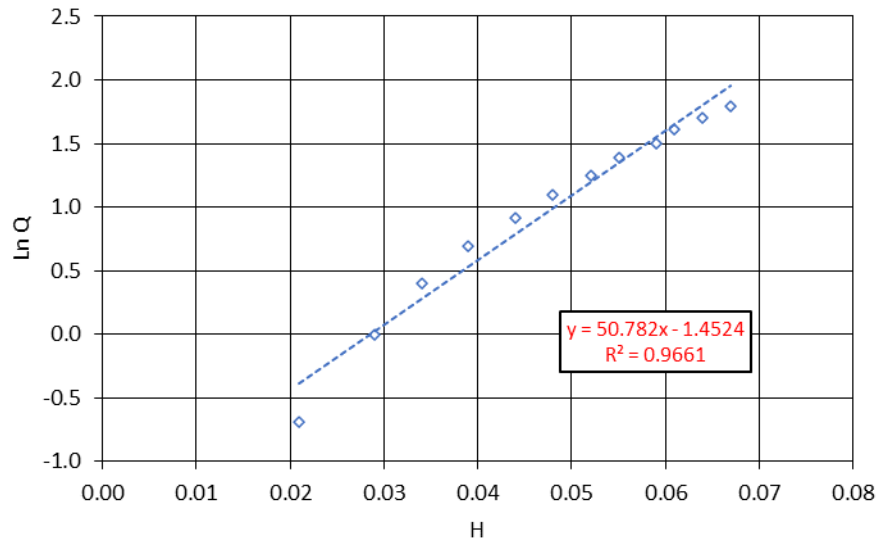
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.067	0.067	1.79
2	5.5	0.064	0.064	1.70
3	5.0	0.061	0.061	1.61
4	4.5	0.059	0.059	1.50
5	4.0	0.055	0.055	1.39
6	3.5	0.052	0.052	1.25
7	3.0	0.048	0.048	1.10
8	2.5	0.044	0.044	0.92
9	2.0	0.039	0.039	0.69
10	1.5	0.034	0.034	0.41
11	1.0	0.029	0.029	0.00
12	0.5	0.021	0.021	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 15, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 42

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 50.782

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -17.4288 / 12$

$c = -1.4524$

$a = e^{c}$

a = 0.234

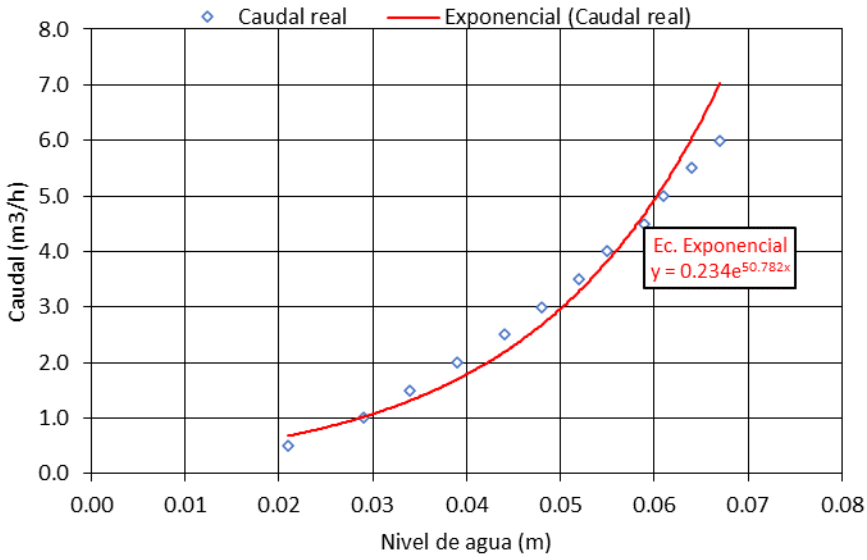
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación exponencial generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 1.5%.

$Q = 0.234\ (e)^{50.782\ (H)}$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 43, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente s=1.5%.

Figura 43

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde “y” es el caudal y “x” es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 16

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.067	6.00	5.7438	0.0657	7.5625	-
2	0.064	5.50	5.2528	0.0611	5.0625	-
3	0.061	5.00	4.7833	0.0469	3.0625	-
4	0.059	4.50	4.4822	0.0003	1.5625	-
5	0.055	4.00	3.9087	0.0083	0.5625	-
6	0.052	3.50	3.5037	0.0000	0.0625	-
7	0.048	3.00	2.9973	0.0000	0.0625	-
8	0.044	2.50	2.5295	0.0009	0.5625	-
9	0.039	2.00	1.9992	0.0000	1.5625	-
10	0.034	1.50	1.5298	0.0009	3.0625	-
11	0.029	1.00	1.1218	0.0148	5.0625	-
12	0.021	0.50	0.5978	0.0096	7.5625	-
Suma	**0.5730**	**39.0000**	**38.4499**	**0.2085**	**35.7500**	**35.5415**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**2.6036**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0478**	**3.2500**	**3.2042**		**R^2 =**	**0.9942**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 16

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=1.5%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	4.9971	1.0059	7.5625	-	6.5941	0.3529	7.5625	-
2	4.7959	0.4958	5.0625	-	5.7152	0.0463	5.0625	-
3	4.5850	0.1722	3.0625	-	4.9536	0.0022	3.0625	-
4	4.4386	0.0038	1.5625	-	4.5030	0.0000	1.5625	-
5	4.1302	0.0169	0.5625	-	3.7212	0.0777	0.5625	-
6	3.8838	0.1473	0.0625	-	3.2252	0.0755	0.0625	-
7	3.5322	0.2833	0.0625	-	2.6652	0.1121	0.0625	-
8	3.1501	0.4226	0.5625	-	2.2025	0.0885	0.5625	-
9	2.6202	0.3847	1.5625	-	1.7353	0.0700	1.5625	-
10	2.0176	0.2679	3.0625	-	1.3673	0.0176	3.0625	-
11	1.3189	0.1017	5.0625	-	1.0773	0.0060	5.0625	-
12	-0.0989	0.3586	7.5625	-	0.7357	0.0555	7.5625	-
Suma	**39.3705**	**3.6607**	**35.7500**	**32.0893**	**38.4956**	**0.9044**	**35.7500**	**34.8456**
Varianza	**2.2293**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**3.3546**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.2809**		**R^2 =**	**0.8976**	**3.2080**		**R^2 =**	**0.9747**

Fuente: Elaboración propia.

VERTEDERO TRAPEZOIDAL – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 2%

En la Tabla 17 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=2%.

Tabla 17

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero trapezoidal y pendiente s=2%.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m3/h)	Ancho del canal B (m)	Abertura α (grados)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6	0.086	16,7°	0.15	0.217	0.067
2	5.5	0.086	16,7°	0.15	0.213	0.063
2	5	0.086	16,7°	0.15	0.211	0.061
3	4.5	0.086	16,7°	0.15	0.208	0.058
3	4	0.086	16,7°	0.15	0.205	0.055
4	3.5	0.086	16,7°	0.15	0.201	0.051
4	3	0.086	16,7°	0.15	0.197	0.047
5	2.5	0.086	16,7°	0.15	0.193	0.043
5	2	0.086	16,7°	0.15	0.189	0.039
6	1.5	0.086	16,7°	0.15	0.184	0.034
6	1	0.086	16,7°	0.15	0.177	0.027
7	0.5	0.086	16,7°	0.15	0.17	0.02

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 2%.

En la Tabla 18 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en un canal rectangular de pendiente S=2%, obtenido con la fórmula de medición de Cipolletti al sumar los caudales de las áreas triangulares y rectangular que conforma la geometría trapezoidal. (Ver Figura 7)

Tabla 18

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	i (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.0	0.067	2.0	8.49557	0.7063
2	5.5	0.063	2.0	7.58486	0.7251
3	5.0	0.061	2.0	7.14968	0.6993
4	4.5	0.058	2.0	6.52186	0.6900
5	4.0	0.055	2.0	5.92372	0.6753
6	3.5	0.051	2.0	5.17185	0.6767
7	3.0	0.047	2.0	4.47150	0.6709
8	2.5	0.043	2.0	3.82199	0.6541
9	2.0	0.039	2.0	3.22268	0.6206
10	1.5	0.034	2.0	2.54327	0.5898
11	1.0	0.027	2.0	1.72054	0.5812
12	0.5	0.02	2.0	1.04638	0.4778

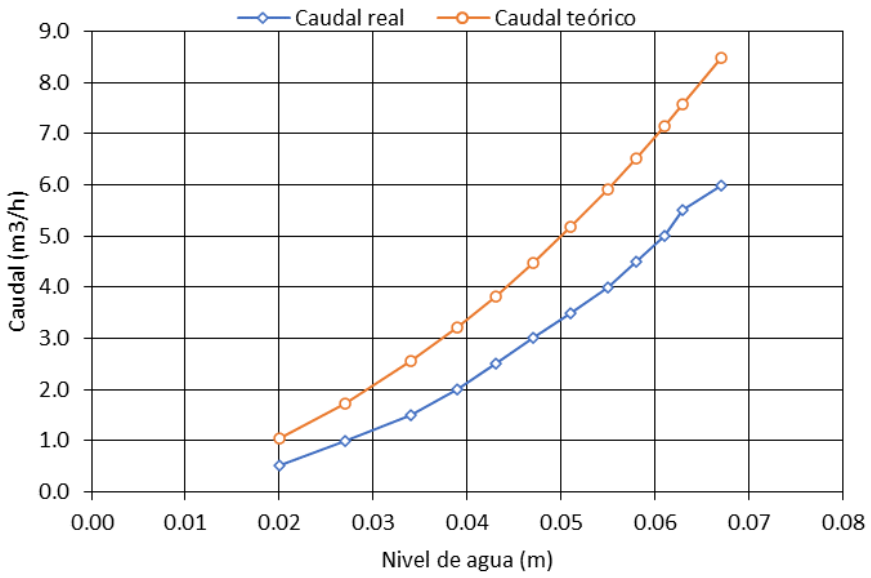
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 2%.

En la Figura 44 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero trapezoidal y caudal del canal rectangular con pendiente s=2%.

Figura 44

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero trapezoidal para s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K\,H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $\boxed{Y = m\,X + b} \Longrightarrow$ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 19

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.

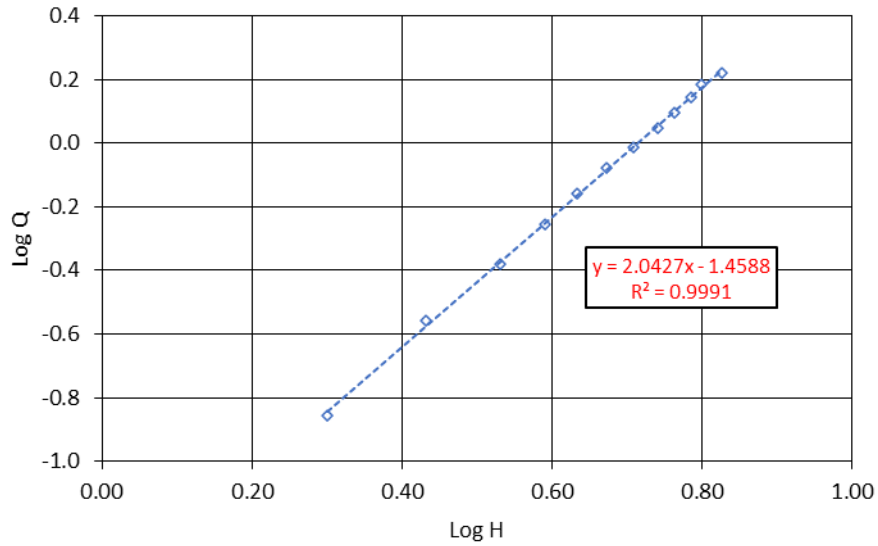
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura h (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.067	0.8261	0.2218
2	5.5	0.063	0.7993	0.1841
3	5.0	0.061	0.7853	0.1427
4	4.5	0.058	0.7634	0.0969
5	4.0	0.055	0.7404	0.0458
6	3.5	0.051	0.7076	-0.0122
7	3.0	0.047	0.6721	-0.0792
8	2.5	0.043	0.6335	-0.1584
9	2.0	0.039	0.5911	-0.2553
10	1.5	0.034	0.5315	-0.3802
11	1.0	0.027	0.4314	-0.5563
12	0.5	0.02	0.3010	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 19, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 45 se obtiene el valor **n=2.0427**.

Figura 45

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

$K = \log^{-1}(-1.4588)$

K = 0.034770

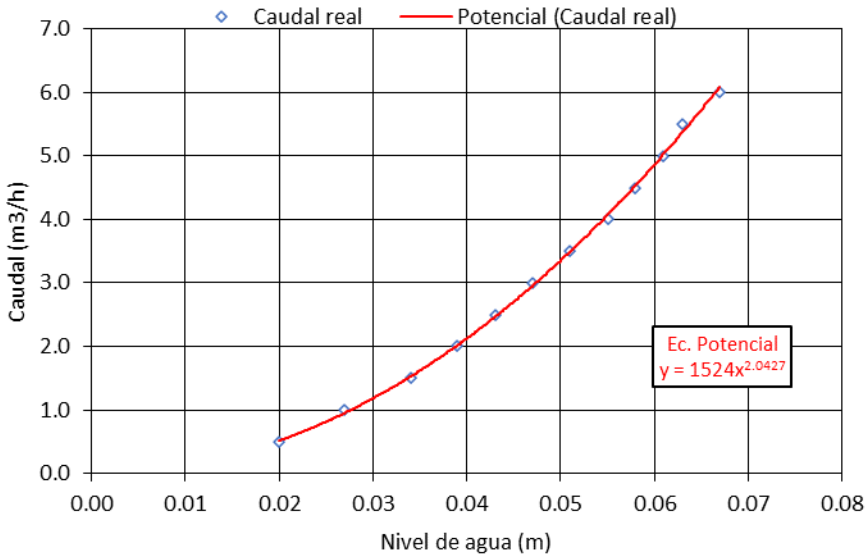
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente igual a 2%.

$Q = 0.034770\ (H)^{2.0427}$ en L/seg o, $Q = 1524\ (H)^{2.0427}$ en m3/h

Con los resultados del ensayo se grafica en la Figura 46 la ecuación potencial del caudal y nivel de agua en vertedero trapezoidal con pendiente de 2%.

Figura 46

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: $Q = a * Ln(H) + b$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 20

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.

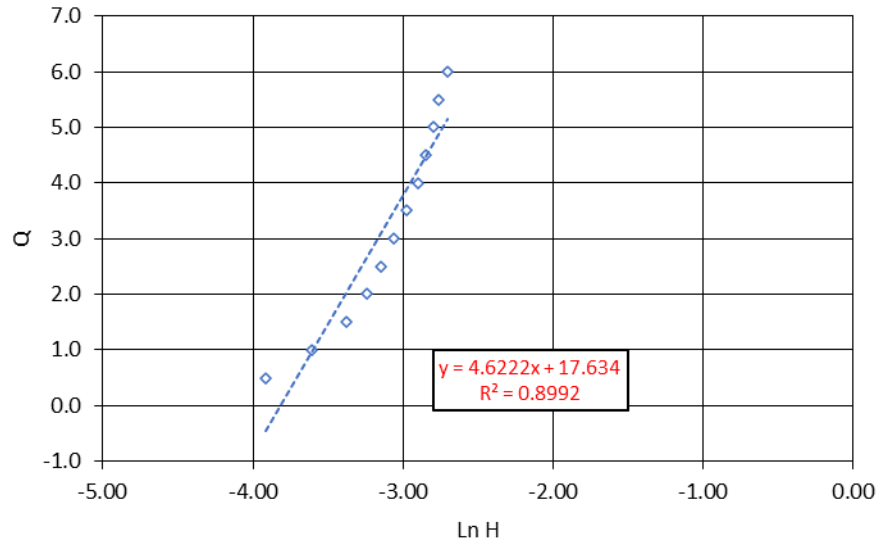
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.067	-2.70	6.00
2	5.5	0.063	-2.76	5.50
3	5.0	0.061	-2.80	5.00
4	4.5	0.058	-2.85	4.50
5	4.0	0.055	-2.90	4.00
6	3.5	0.051	-2.98	3.50
7	3.0	0.047	-3.06	3.00
8	2.5	0.043	-3.15	2.50
9	2.0	0.039	-3.24	2.00
10	1.5	0.034	-3.38	1.50
11	1.0	0.027	-3.61	1.00
12	0.5	0.02	-3.91	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 20, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 47

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.6222

b = 17.634

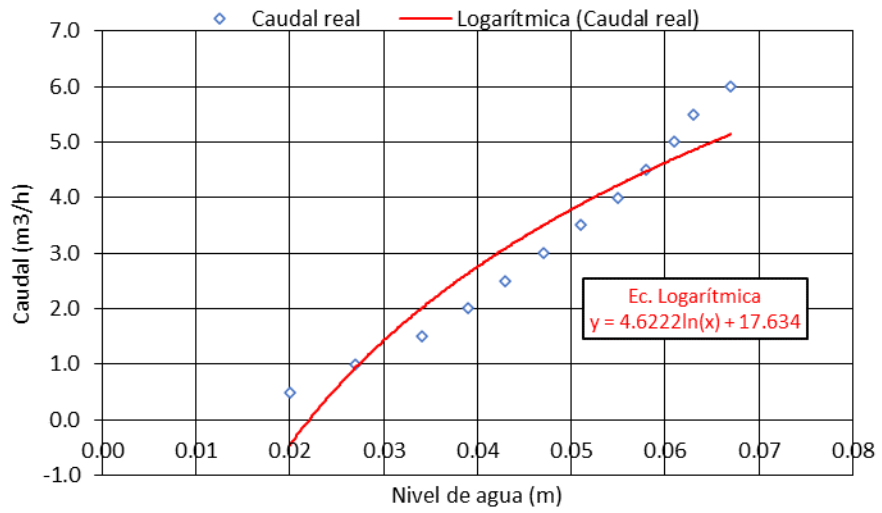
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente s=2%.

Q = 4.6222 * Ln(H) + 17.634

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 48 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente de 2%.

Figura 48

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 21

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.

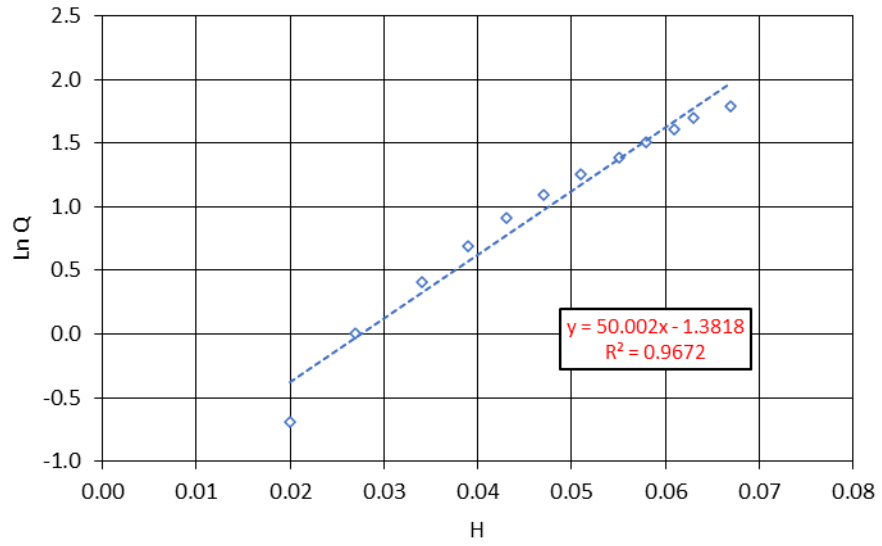
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.067	0.067	1.79
2	5.5	0.063	0.063	1.70
3	5.0	0.061	0.061	1.61
4	4.5	0.058	0.058	1.50
5	4.0	0.055	0.055	1.39
6	3.5	0.051	0.051	1.25
7	3.0	0.047	0.047	1.10
8	2.5	0.043	0.043	0.92
9	2.0	0.039	0.039	0.69
10	1.5	0.034	0.034	0.41
11	1.0	0.027	0.027	0.00
12	0.5	0.02	0.02	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 15, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 49

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 50.002

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -16.5816 / 12$

$c = -1.3818$

$a = e^{c}$

a = 0.2511

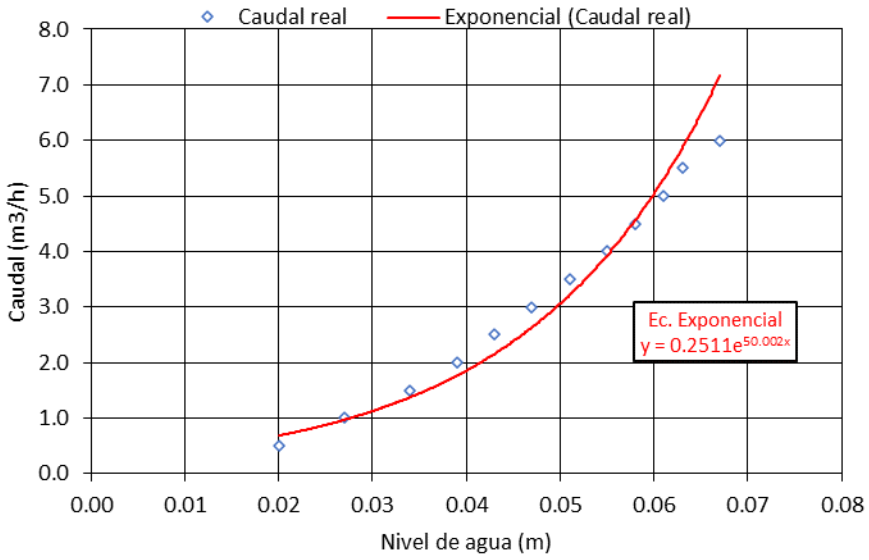
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo trapezoidal en canal rectangular con pendiente de 2%.

$Q = 0.2511\ (e)^{50.002\ (H)}$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 50, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero trapezoidal con pendiente s=2%.

Figura 50

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde “y” es el caudal y “x” es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 22

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.067	6.00	5.7438	0.0657	7.5625	-
2	0.063	5.50	5.0940	0.1649	5.0625	-
3	0.061	5.00	4.7833	0.0469	3.0625	-
4	0.058	4.50	4.3353	0.0271	1.5625	-
5	0.055	4.00	3.9087	0.0083	0.5625	-
6	0.051	3.50	3.3735	0.0160	0.0625	-
7	0.047	3.00	2.8767	0.0152	0.0625	-
8	0.043	2.50	2.4186	0.0066	0.5625	-
9	0.039	2.00	1.9992	0.0000	1.5625	-
10	0.034	1.50	1.5298	0.0009	3.0625	-
11	0.027	1.00	0.9759	0.0006	5.0625	-
12	0.02	0.50	0.5435	0.0019	7.5625	-
Suma	**0.5650**	**39.0000**	**37.5821**	**0.3542**	**35.7500**	**35.3958**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**2.6067**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0471**	**3.2500**	**3.1318**		**R^2 =**	**0.9901**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 22

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	4.9971	1.0059	7.5625	-	6.5941	0.3529	7.5625	-
2	4.7267	0.5980	5.0625	-	5.4492	0.0026	5.0625	-
3	4.5850	0.1722	3.0625	-	4.9536	0.0022	3.0625	-
4	4.3635	0.0186	1.5625	-	4.2934	0.0427	1.5625	-
5	4.1302	0.0169	0.5625	-	3.7212	0.0777	0.5625	-
6	3.7985	0.0891	0.0625	-	3.0751	0.1806	0.0625	-
7	3.4398	0.1934	0.0625	-	2.5412	0.2105	0.0625	-
8	3.0491	0.3015	0.5625	-	2.0999	0.1600	0.5625	-
9	2.6202	0.3847	1.5625	-	1.7353	0.0700	1.5625	-
10	2.0176	0.2679	3.0625	-	1.3673	0.0176	3.0625	-
11	1.0050	0.0000	5.0625	-	0.9793	0.0004	5.0625	-
12	-0.3132	0.6612	7.5625	-	0.7014	0.0406	7.5625	-
Suma	**38.4193**	**3.7095**	**35.7500**	**32.0405**	**37.5108**	**1.1579**	**35.7500**	**34.5921**
Varianza	**2.4192**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**3.2827**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.2016**		**R^2 =**	**0.8962**	**3.1259**		**R^2 =**	**0.9676**

Fuente: Elaboración propia.

VERTEDERO SEMICIRCULAR – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 1%

En la Tabla 23 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=1%.

Tabla 23

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=1%.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m^3/h)	Ancho del canal B (m)	Diámetro D (m)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6	0.086	0.06	0.15	0.214	0.064
2	5.5	0.086	0.06	0.15	0.21	0.06
3	5	0.086	0.06	0.15	0.207	0.057
4	4.5	0.086	0.06	0.15	0.204	0.054
5	4	0.086	0.06	0.15	0.201	0.051
6	3.5	0.086	0.06	0.15	0.197	0.047
7	3	0.086	0.06	0.15	0.193	0.043
8	2.5	0.086	0.06	0.15	0.189	0.039
9	2	0.086	0.06	0.15	0.185	0.035
10	1.5	0.086	0.06	0.15	0.181	0.031
11	1	0.086	0.06	0.15	0.175	0.025
12	0.5	0.086	0.06	0.15	0.169	0.019

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 1%.

En la Tabla 24 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=1%, obtenido con la fórmula de medición de caudal en vertedero con sección semicircular.

Tabla 24

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	i (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.0	0.064	1.0	5.42	1.1080
2	5.5	0.06	1.0	4.82	1.1413
3	5.0	0.057	1.0	4.39	1.1383
4	4.5	0.054	1.0	3.98	1.1296
5	4.0	0.051	1.0	3.59	1.1134
6	3.5	0.047	1.0	3.10	1.1292
7	3.0	0.043	1.0	2.64	1.1366
8	2.5	0.039	1.0	2.21	1.1299
9	2.0	0.035	1.0	1.82	1.0992
10	1.5	0.031	1.0	1.46	1.0265
11	1.0	0.025	1.0	0.99	1.0095
12	0.5	0.019	1.0	0.60	0.8288

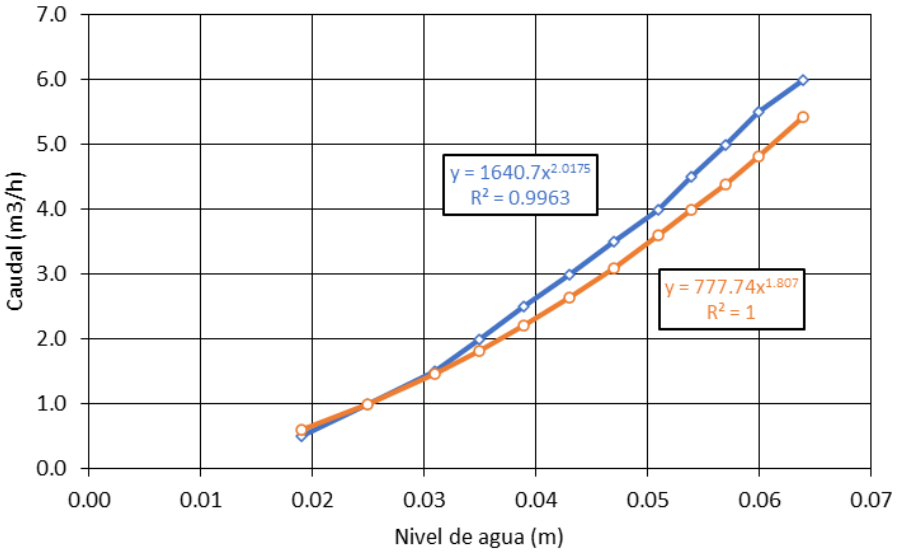
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero semicircular en canal rectangular con pendiente de 1%.

En la Figura 51 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular y caudal del canal rectangular con pendiente s=1%.

Figura 51

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $Y = m X + b$ ⟹ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 25

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.

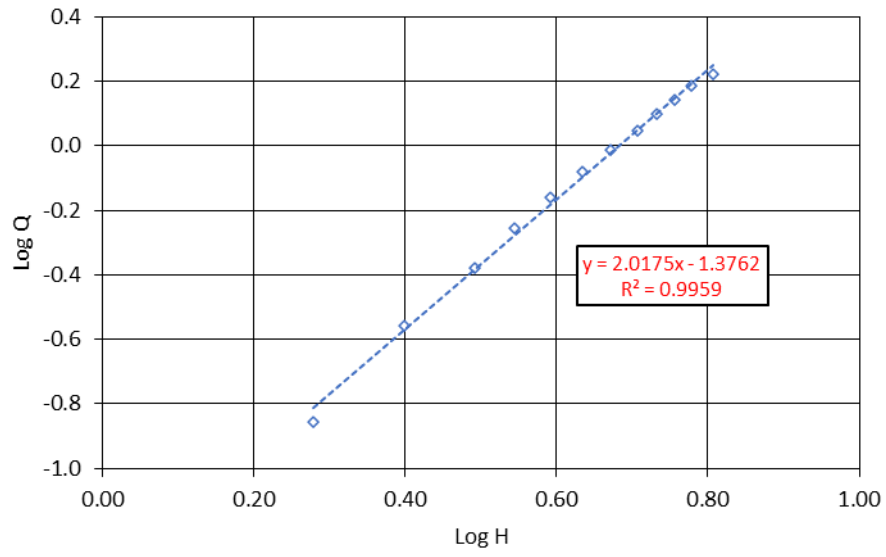
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura h (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.064	0.8062	0.2218
2	5.5	0.06	0.7782	0.1841
3	5.0	0.057	0.7559	0.1427
4	4.5	0.054	0.7324	0.0969
5	4.0	0.051	0.7076	0.0458
6	3.5	0.047	0.6721	-0.0122
7	3.0	0.043	0.6335	-0.0792
8	2.5	0.039	0.5911	-0.1584
9	2.0	0.035	0.5441	-0.2553
10	1.5	0.031	0.4914	-0.3802
11	1.0	0.025	0.3979	-0.5563
12	0.5	0.019	0.2788	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 25, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 52 se obtiene el valor **n=2.0175**.

Figura 52

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

K = log -1 (-1.3762)

K = 0.042053

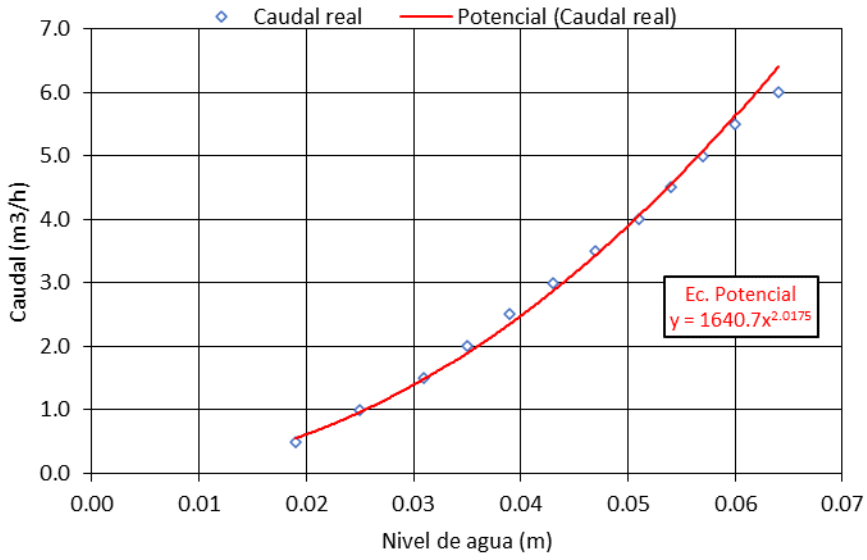
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente s=1%.

$Q = 0.042053\ (H)^{2.0175}$ en L/seg o, $Q = 1640.7\ (H)^{2.0175}$ en m3/h

Con los resultados del ensayo se grafica en la Figura 53 la relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto en vertedero semicircular con pendiente de 1%.

Figura 53

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: Q = a * Ln (H) + b

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 26

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1%.

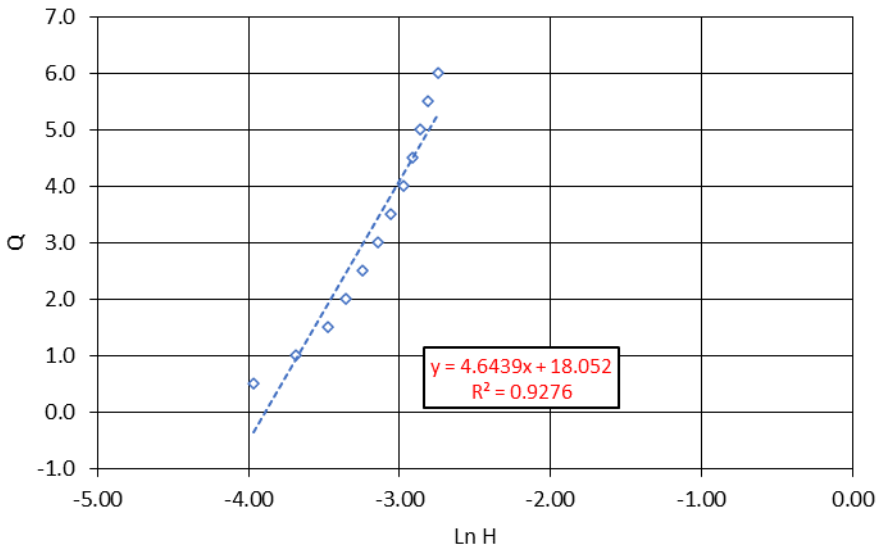
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.064	-2.75	6.00
2	5.5	0.06	-2.81	5.50
3	5.0	0.057	-2.86	5.00
4	4.5	0.054	-2.92	4.50
5	4.0	0.051	-2.98	4.00
6	3.5	0.047	-3.06	3.50
7	3.0	0.043	-3.15	3.00
8	2.5	0.039	-3.24	2.50
9	2.0	0.035	-3.35	2.00
10	1.5	0.031	-3.47	1.50
11	1.0	0.025	-3.69	1.00
12	0.5	0.019	-3.96	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 26, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 54

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.6439

b = 18.052

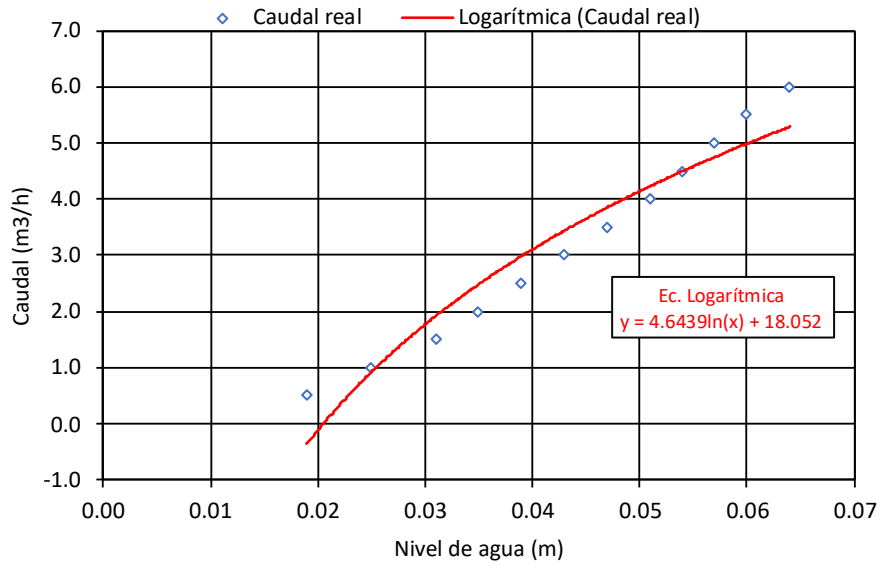
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente s=1%.

Q = 4.6439 * Ln(H) + 18.052

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 55 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente de 1%.

Figura 55

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 27

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.

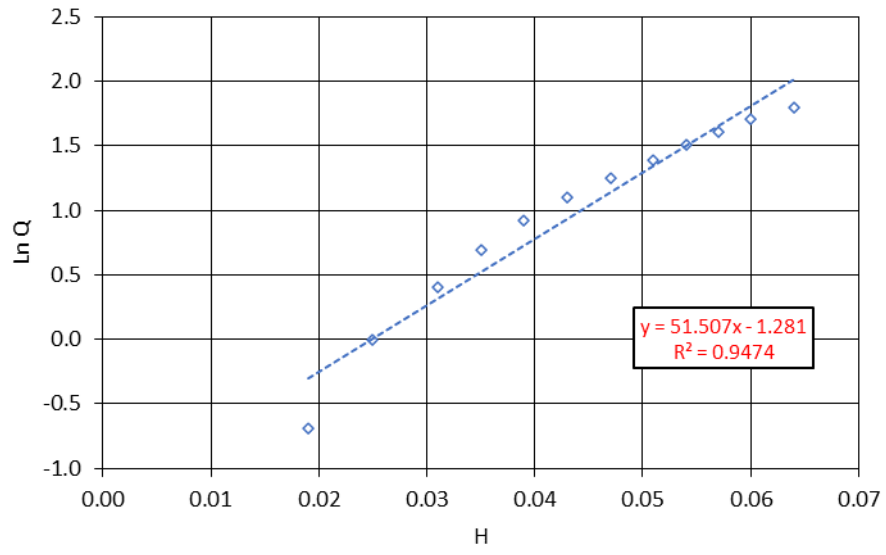
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.064	0.064	1.79
2	5.5	0.06	0.06	1.70
3	5.0	0.057	0.057	1.61
4	4.5	0.054	0.054	1.50
5	4.0	0.051	0.051	1.39
6	3.5	0.047	0.047	1.25
7	3.0	0.043	0.043	1.10
8	2.5	0.039	0.039	0.92
9	2.0	0.035	0.035	0.69
10	1.5	0.031	0.031	0.41
11	1.0	0.025	0.025	0.00
12	0.5	0.019	0.019	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 27, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 56

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 51.507

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -15.3715 / 12$

$c = -1.281$

$a = e^{c}$

a = 0.2778

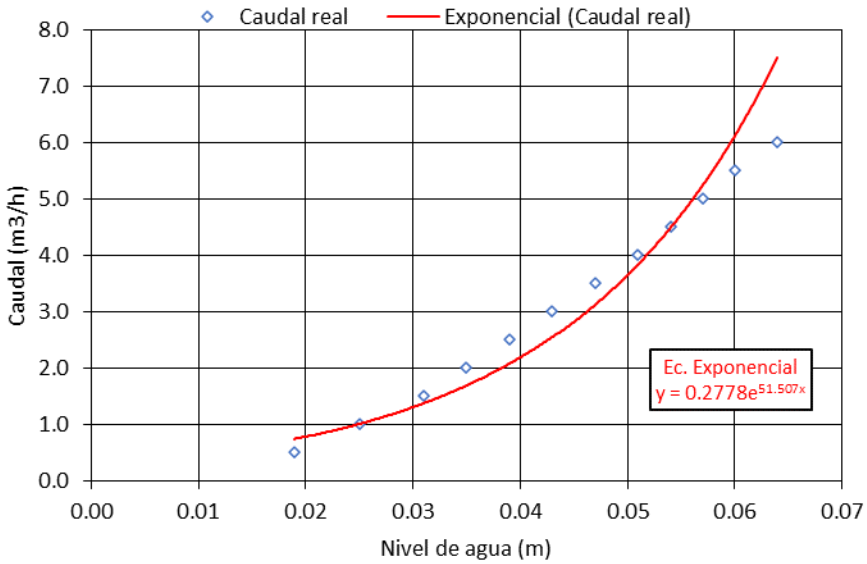
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente de 1%.

$Q = 0.2778\ (e)^{51.507\ (H)}$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 57, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente s=1%.

Figura 57

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde “y” es el caudal y “x” es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 28

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.064	6.00	6.4057	0.1646	7.5625	-
2	0.06	5.50	5.6237	0.0153	5.0625	-
3	0.057	5.00	5.0708	0.0050	3.0625	-
4	0.054	4.50	4.5468	0.0022	1.5625	-
5	0.051	4.00	4.0516	0.0027	0.5625	-
6	0.047	3.50	3.4360	0.0041	0.0625	-
7	0.043	3.00	2.8716	0.0165	0.0625	-
8	0.039	2.50	2.3582	0.0201	0.5625	-
9	0.035	2.00	1.8956	0.0109	1.5625	-
10	0.031	1.50	1.4840	0.0003	3.0625	-
11	0.025	1.00	0.9615	0.0015	5.0625	-
12	0.019	0.50	0.5527	0.0028	7.5625	-
Suma	**0.5740**	**39.0000**	**39.2582**	**0.2459**	**35.7500**	**35.5041**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**3.3055**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0478**	**3.2500**	**3.2715**		**R^2 =**	**0.9931**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 28

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	5.2865	0.5091	7.5625	-	7.5050	2.2650	7.5625	-
2	4.9868	0.2634	5.0625	-	6.1077	0.3692	5.0625	-
3	4.7486	0.0632	3.0625	-	5.2332	0.0544	3.0625	-
4	4.4975	0.0000	1.5625	-	4.4839	0.0003	1.5625	-
5	4.2321	0.0539	0.5625	-	3.8420	0.0250	0.5625	-
6	3.8528	0.1245	0.0625	-	3.1266	0.1394	0.0625	-
7	3.4397	0.1933	0.0625	-	2.5445	0.2075	0.0625	-
8	2.9863	0.2365	0.5625	-	2.0707	0.1843	0.5625	-
9	2.4838	0.2340	1.5625	-	1.6852	0.0991	1.5625	-
10	1.9202	0.1765	3.0625	-	1.3714	0.0165	3.0625	-
11	0.9212	0.0062	5.0625	-	1.0068	0.0000	5.0625	-
12	-0.3532	0.7280	7.5625	-	0.7392	0.0572	7.5625	-
Suma	**39.0022**	**2.5886**	**35.7500**	**33.1614**	**39.7162**	**3.4179**	**35.7500**	**32.3321**
Varianza	**2.7635**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**4.2710**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.2502**		**R^2 =**	**0.9276**	**3.3097**		**R^2 =**	**0.9044**

Fuente: Elaboración propia.

VERTEDERO SEMICIRCULAR – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 1.5%

En la Tabla 29 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=1.5%.

Tabla 29

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=1.5%.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m^3/h)	Ancho del canal B (m)	Diámetro D (m)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6	0.086	0.06	0.15	0.212	0.062
2	5.5	0.086	0.06	0.15	0.209	0.059
3	5	0.086	0.06	0.15	0.207	0.057
4	4.5	0.086	0.06	0.15	0.203	0.053
5	4	0.086	0.06	0.15	0.200	0.05
6	3.5	0.086	0.06	0.15	0.196	0.046
7	3	0.086	0.06	0.15	0.192	0.042
8	2.5	0.086	0.06	0.15	0.188	0.038
9	2	0.086	0.06	0.15	0.184	0.034
10	1.5	0.086	0.06	0.15	0.179	0.029
11	1	0.086	0.06	0.15	0.174	0.024
12	0.5	0.086	0.06	0.15	0.169	0.019

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 1.5%.

En la Tabla 30 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=1.5%, obtenido con la fórmula de medición de caudal en vertedero con sección semicircular.

Tabla 30

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	i (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.00	0.062	1,5	5.11	1.1735
2	5.50	0.059	1,5	4.67	1.1765
3	5.00	0.057	1,5	4.39	1.1383
4	4.50	0.053	1,5	3.85	1.1685
5	4.00	0.05	1,5	3.47	1.1540
6	3.50	0.046	1,5	2.98	1.1739
7	3.00	0.042	1,5	2.53	1.1860
8	2.50	0.038	1,5	2.11	1.1842
9	2.00	0.034	1,5	1.73	1.1583
10	1.50	0.029	1,5	1.30	1.1580
11	1.00	0.024	1,5	0.92	1.0867
12	0.50	0.019	1,5	0.60	0.8288

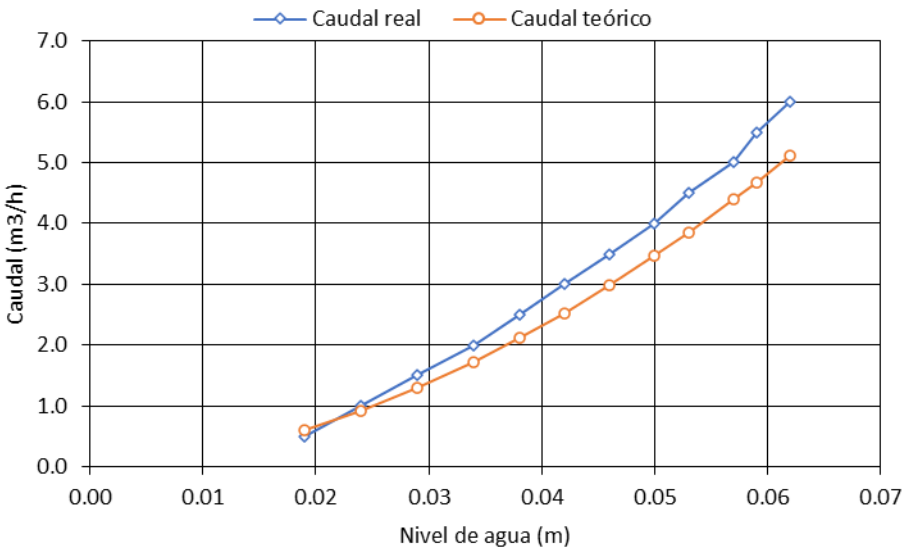
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero semicircular en canal rectangular con pendiente de 1.5%.

En la Figura 58 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular y caudal del canal rectangular con pendiente s=1.5%.

Figura 58

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular para pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K\,H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $Y = m\,X + b$ ⟹ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 31

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.

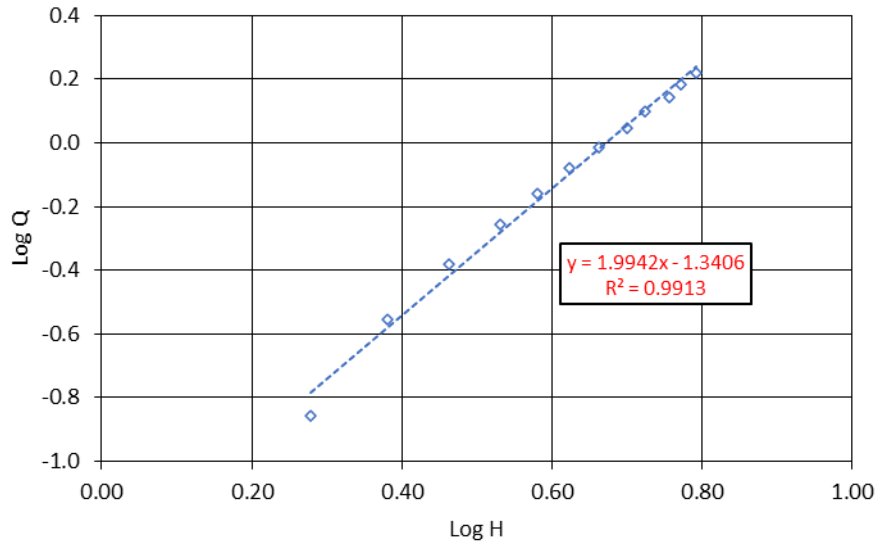
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura h (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.062	0.7924	0.2218
2	5.5	0.059	0.7709	0.1841
3	5.0	0.057	0.7559	0.1427
4	4.5	0.053	0.7243	0.0969
5	4.0	0.05	0.6990	0.0458
6	3.5	0.046	0.6628	-0.0122
7	3.0	0.042	0.6232	-0.0792
8	2.5	0.038	0.5798	-0.1584
9	2.0	0.034	0.5315	-0.2553
10	1.5	0.029	0.4624	-0.3802
11	1.0	0.024	0.3802	-0.5563
12	0.5	0.019	0.2788	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 31, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 59 se obtiene el valor **n=1.9942**.

Figura 59

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

$K = \log^{-1} (-1.3406)$

K = 0.045646

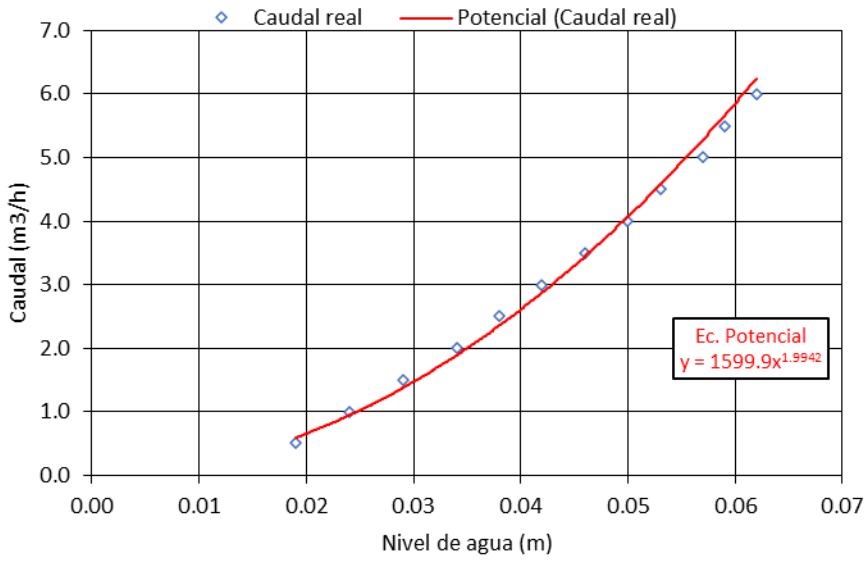
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente s=1.5%.

$Q = 0.045646\ (H)^{1.9942}$ en L/seg o, $Q = 1599.9\ (H)^{1.9942}$ en m3/h

Con los resultados del ensayo se grafica en la Figura 60 la ecuación potencial del caudal y nivel de agua medido en vertedero semicircular con pendiente de 1.5%.

Figura 60

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: $Q = a * Ln (H) + b$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 32

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.

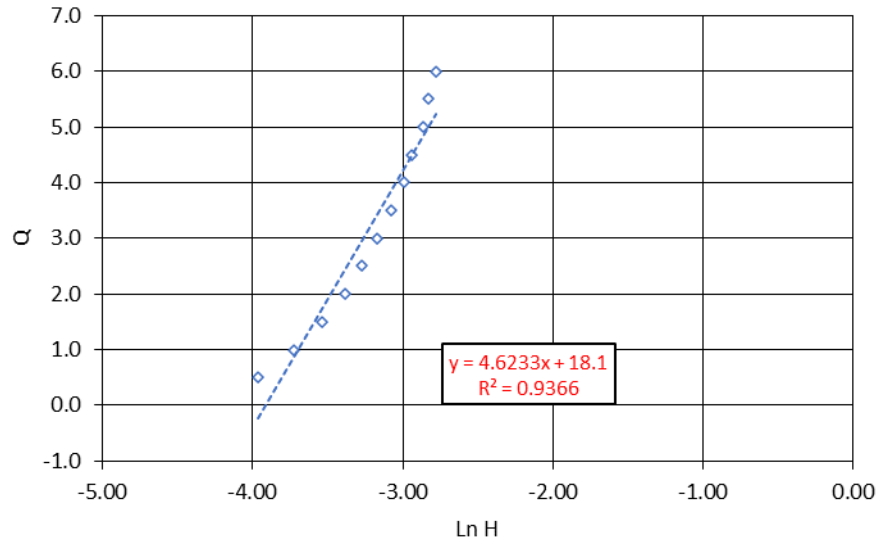
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.062	-2.78	6.00
2	5.5	0.059	-2.83	5.50
3	5.0	0.057	-2.86	5.00
4	4.5	0.053	-2.94	4.50
5	4.0	0.05	-3.00	4.00
6	3.5	0.046	-3.08	3.50
7	3.0	0.042	-3.17	3.00
8	2.5	0.038	-3.27	2.50
9	2.0	0.034	-3.38	2.00
10	1.5	0.029	-3.54	1.50
11	1.0	0.024	-3.73	1.00
12	0.5	0.019	-3.96	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 32, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 61

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.6233

b = 18.1

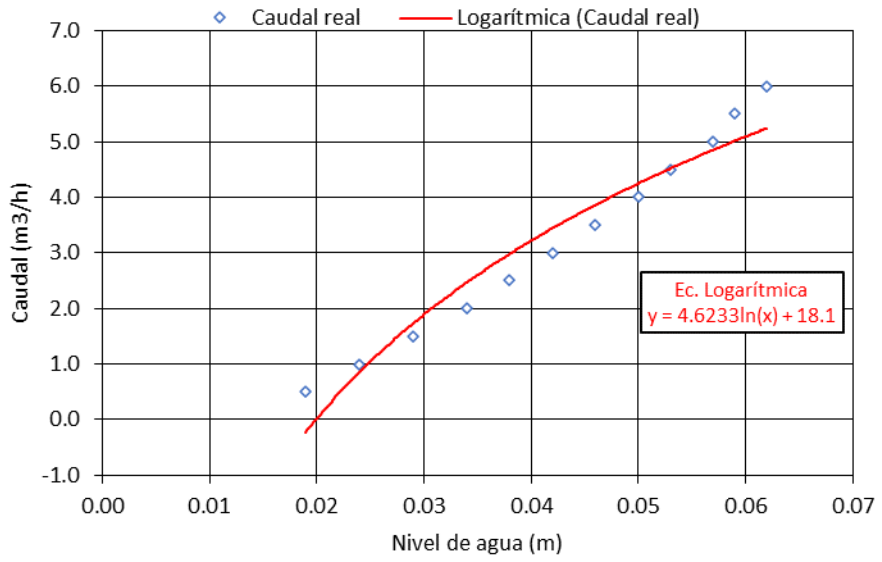
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente s=1.5%.

Q = 4.6233 * Ln(H) + 18.1

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 62 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente de 1.5%.

Figura 62

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 33

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.

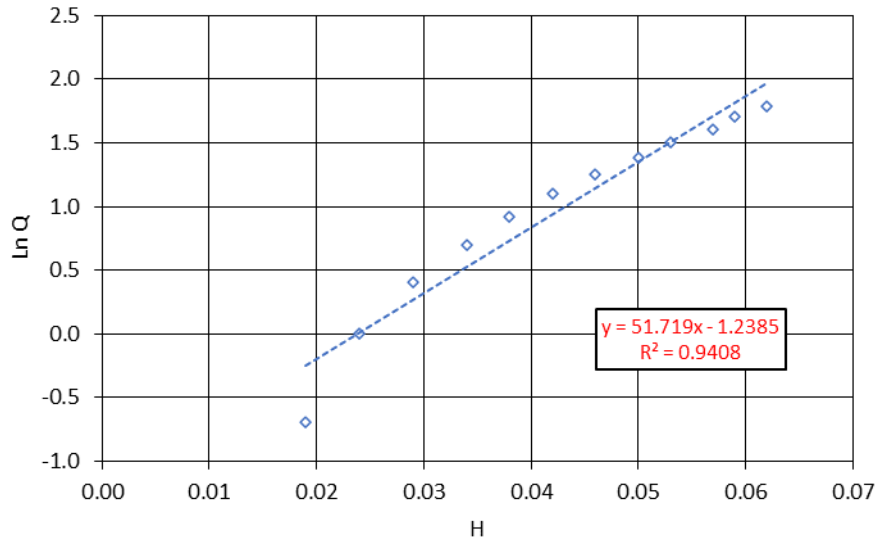
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.062	0.062	1.79
2	5.5	0.059	0.059	1.70
3	5.0	0.057	0.057	1.61
4	4.5	0.053	0.053	1.50
5	4.0	0.05	0.05	1.39
6	3.5	0.046	0.046	1.25
7	3.0	0.042	0.042	1.10
8	2.5	0.038	0.038	0.92
9	2.0	0.034	0.034	0.69
10	1.5	0.029	0.029	0.41
11	1.0	0.024	0.024	0.00
12	0.5	0.019	0.019	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 33, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 63

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=1.5%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 51.719

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -14.8625 / 12$

$c = -1.2385$

$a = e^{c}$

a = 0.2898

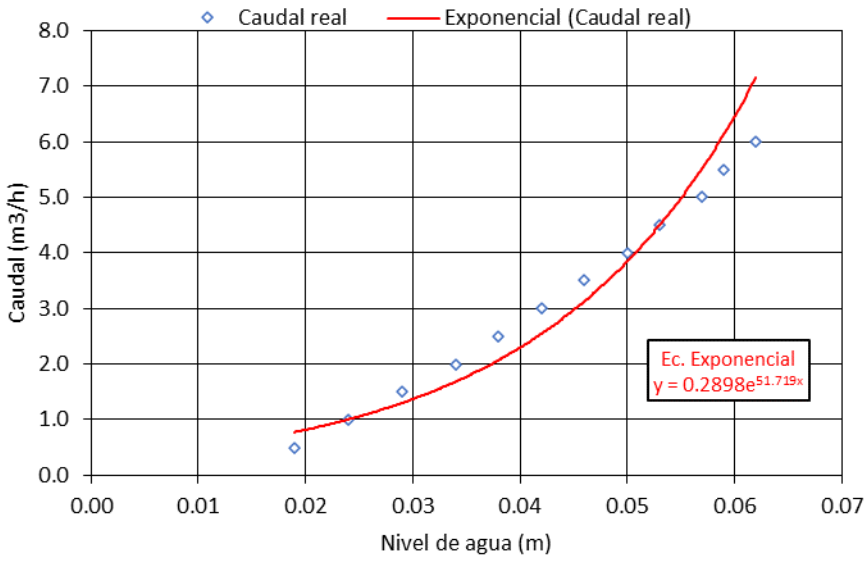
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente de 1.5%.

$Q = 0.2898\ (e)^{51.719\ (H)}$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 64, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente s=1.5%.

Figura 64

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 34

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.062	6.00	6.0083	0.0001	7.5625	-
2	0.059	5.50	5.4362	0.0041	5.0625	-
3	0.057	5.00	5.0708	0.0050	3.0625	-
4	0.053	4.50	4.3785	0.0148	1.5625	-
5	0.05	4.00	3.8929	0.0115	0.5625	-
6	0.046	3.50	3.2901	0.0440	0.0625	-
7	0.042	3.00	2.7385	0.0684	0.0625	-
8	0.038	2.50	2.2378	0.0688	0.5625	-
9	0.034	2.00	1.7880	0.0450	1.5625	-
10	0.029	1.50	1.2971	0.0412	3.0625	-
11	0.024	1.00	0.8855	0.0131	5.0625	-
12	0.019	0.50	0.5527	0.0028	7.5625	-
Suma	**0.5130**	**39.0000**	**37.5764**	**0.3186**	**35.7500**	**35.4314**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**3.1105**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0428**	**3.2500**	**3.1314**		**R^2 =**	**0.9911**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 34

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=1.5%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	5.1391	0.7412	7.5625	-	6.7704	0.5935	7.5625	-
2	4.9088	0.3496	5.0625	-	5.8010	0.0906	5.0625	-
3	4.7486	0.0632	3.0625	-	5.2332	0.0544	3.0625	-
4	4.4107	0.0080	1.5625	-	4.2588	0.0582	1.5625	-
5	4.1401	0.0196	0.5625	-	3.6491	0.1231	0.5625	-
6	3.7529	0.0640	0.0625	-	2.9697	0.2813	0.0625	-
7	3.3304	0.1092	0.0625	-	2.4167	0.3402	0.0625	-
8	2.8657	0.1337	0.5625	-	1.9668	0.2843	0.5625	-
9	2.3491	0.1219	1.5625	-	1.6006	0.1595	1.5625	-
10	1.6105	0.0122	3.0625	-	1.2372	0.0691	3.0625	-
11	0.7316	0.0720	5.0625	-	0.9563	0.0019	5.0625	-
12	-0.3532	0.7280	7.5625	-	0.7392	0.0572	7.5625	-
Suma	**37.6343**	**2.4226**	**35.7500**	**33.3274**	**37.5989**	**2.1132**	**35.7500**	**33.6368**
Varianza	**2.8152**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**3.7170**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.1362**		**R^2 =**	**0.9322**	**3.1332**		**R^2 =**	**0.9409**

Fuente: Elaboración propia.

VERTEDERO SEMICIRCULAR – CANAL RECTANGULAR – PENDIENTE 2%

En la Tabla 35 se muestra los resultados del ensayo de medición del caudal y el nivel de agua por encima del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=2%.

Tabla 35

Resumen del ensayo en canal rectangular con vertedero semicircular y pendiente s=2%.

Ensayo N° Unidad	Caudal de entrada (m^3/h)	Ancho del canal B (m)	Diámetro D (m)	Altura de presa hw (m)	Nivel aguas arriba ho (m)	Nivel de agua h (m)
1	6	0.086	0.06	0.15	0.211	0.061
2	5.5	0.086	0.06	0.15	0.208	0.058
3	5	0.086	0.06	0.15	0.205	0.055
4	4.5	0.086	0.06	0.15	0.203	0.053
5	4	0.086	0.06	0.15	0.199	0.049
6	3.5	0.086	0.06	0.15	0.195	0.045
7	3	0.086	0.06	0.15	0.191	0.041
8	2.5	0.086	0.06	0.15	0.187	0.037
9	2	0.086	0.06	0.15	0.184	0.034
10	1.5	0.086	0.06	0.15	0.178	0.028
11	1	0.086	0.06	0.15	0.173	0.023
12	0.5	0.086	0.06	0.15	0.168	0.018

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que el incremento del caudal de entrada en el canal, aumenta el nivel de agua por encima de la cresta del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y caudal del canal rectangular con pendiente de 2%.

En la Tabla 36 se observa los resultados de coeficientes de gasto del vertedero de pared delgada tipo semicircular en un canal rectangular de pendiente S=2%, obtenido con la fórmula de medición de caudal en vertedero con sección semicircular.

Tabla 36

Resultados del caudal y coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%

Ensayo N°	Q (m3/h)	h (m)	i (%)	Qt (m3/h)	Cd
1	6.00	0.061	2.0	4.97	1.2084
2	5.50	0.058	2.0	4.53	1.2134
3	5.00	0.055	2.0	4.12	1.2142
4	4.50	0.053	2.0	3.85	1.1685
5	4.00	0.049	2.0	3.34	1.1969
6	3.50	0.045	2.0	2.87	1.2215
7	3.00	0.041	2.0	2.42	1.2388
8	2.50	0.037	2.0	2.01	1.2427
9	2.00	0.034	2.0	1.73	1.1583
10	1.50	0.028	2.0	1.22	1.2338
11	1.00	0.023	2.0	0.85	1.1736
12	0.50	0.018	2.0	0.55	0.9138

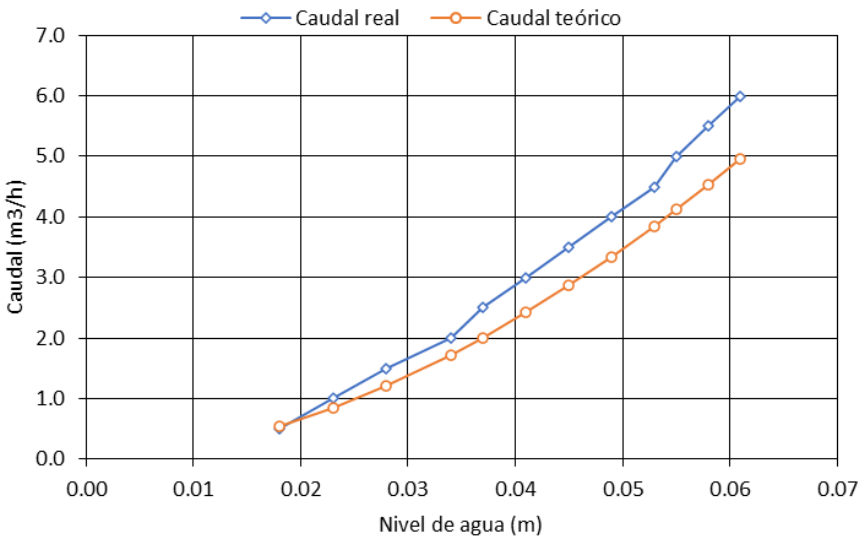
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en este caso que con el incremento del nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular, ocurre un aumento de los valores del coeficiente de gasto del vertedero, lo cual indica que existe una relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto de vertedero semicircular en canal rectangular con pendiente de 2%.

En la Figura 65 se observa la gráfica de relación entre el nivel de agua que pasa por encima del vertedero semicircular y caudal del canal rectangular con pendiente s=2%.

Figura 65

Relación del nivel de agua y caudal en vertedero semicircular para s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO POTENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo potencial, cuya expresión es: $Q = K H^{n}$

Para obtener los factores K y n se calcula los logaritmos de las variables H y Q, luego se reemplaza en la siguiente expresión:

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

sustituyendo: $Y = m X + b$ ⟹ Ec. Recta

Donde: Y = log **Q**

m = **n**

X = log **H**

b = log **K**

Tabla 37

Datos de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.

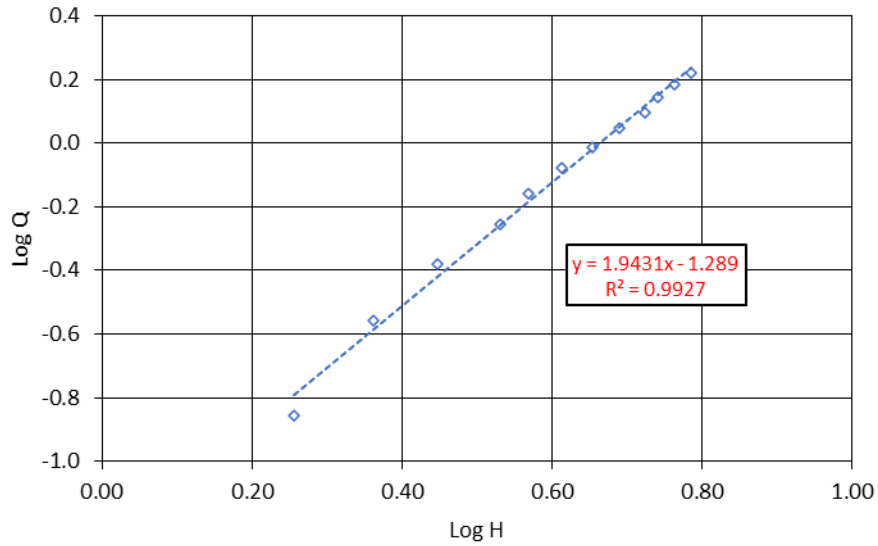
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura h (m)	Log H	Log Q
1	6.0	0.061	0.7853	0.2218
2	5.5	0.058	0.7634	0.1841
3	5.0	0.055	0.7404	0.1427
4	4.5	0.053	0.7243	0.0969
5	4.0	0.049	0.6902	0.0458
6	3.5	0.045	0.6532	-0.0122
7	3.0	0.041	0.6128	-0.0792
8	2.5	0.037	0.5682	-0.1584
9	2.0	0.034	0.5315	-0.2553
10	1.5	0.028	0.4472	-0.3802
11	1.0	0.023	0.3617	-0.5563
12	0.5	0.018	0.2553	-0.8573

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 37, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal. De la Figura 66 se obtiene el valor **n=1.9431**.

Figura 66

Gráfica de ajuste para modelo potencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de K reemplazando en la ecuación:

$K = \log^{-1} (-1.289)$

K = 0.051393

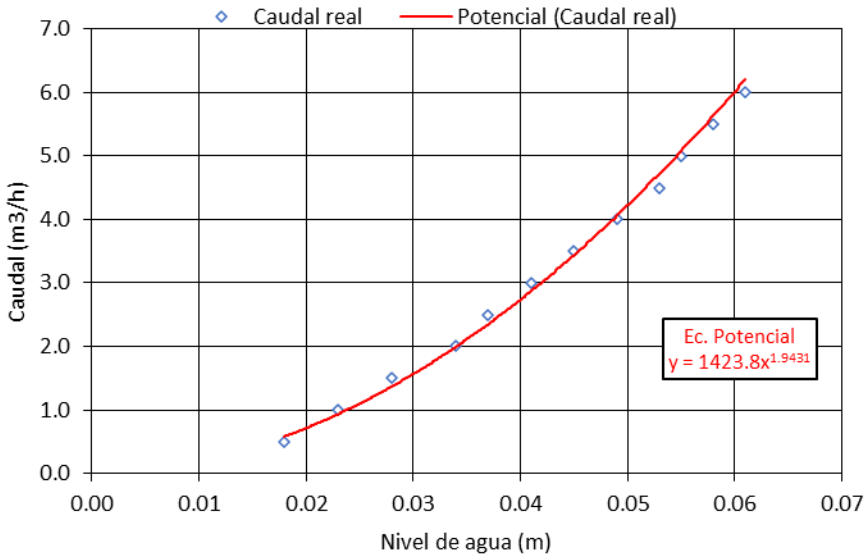
Encontrando los valores de K y n, se tiene la ecuación potencial generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente igual a 2%.

$Q = 0.051393\ (H)^{1.9431}$ en L/seg o, $Q = 1423.8\ (H)^{1.9431}$ en m^3/h

Con los resultados del ensayo se grafica en la Figura 67 la relación entre el nivel de agua y coeficiente de gasto en vertedero semicircular con pendiente de 2%.

Figura 67

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución potencial de vertedero de pared delgada tipo trapezoidal de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo potencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO LOGARÍTMICO.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo logarítmica, cuya expresión es: $Q = a * Ln (H) + b$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable H y luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 38

Datos de ajuste para modelo logarítmico de vertedero semicircular de pendiente s=2%.

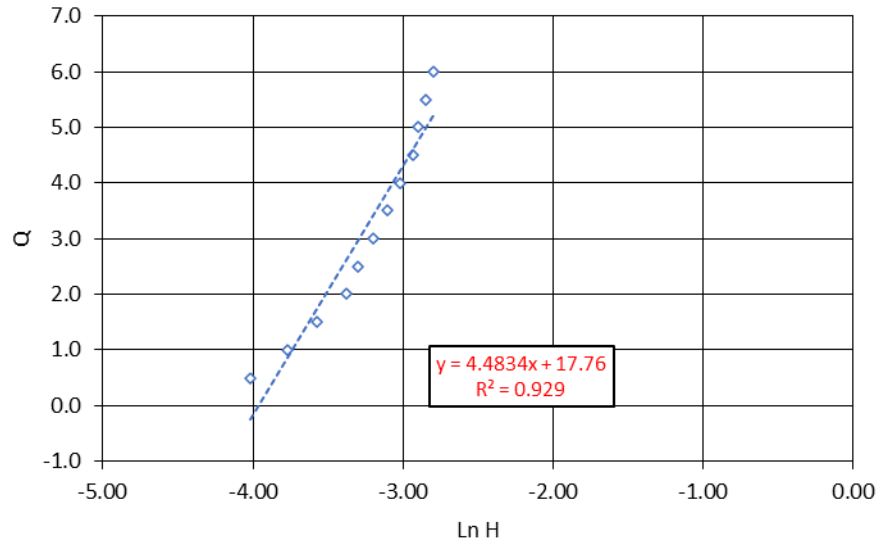
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	Ln H	Q
1	6.0	0.067	-2.70	6.00
2	5.5	0.063	-2.76	5.50
3	5.0	0.061	-2.80	5.00
4	4.5	0.058	-2.85	4.50
5	4.0	0.055	-2.90	4.00
6	3.5	0.051	-2.98	3.50
7	3.0	0.047	-3.06	3.00
8	2.5	0.043	-3.15	2.50
9	2.0	0.039	-3.24	2.00
10	1.5	0.034	-3.38	1.50
11	1.0	0.027	-3.61	1.00
12	0.5	0.02	-3.91	0.50

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de H y Q en la Tabla 38, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 68

Gráfica de ajuste para modelo logarítmico de vertedero trapezoidal de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de a y b reemplazando variables:

a = 4.4834

b = 17.76

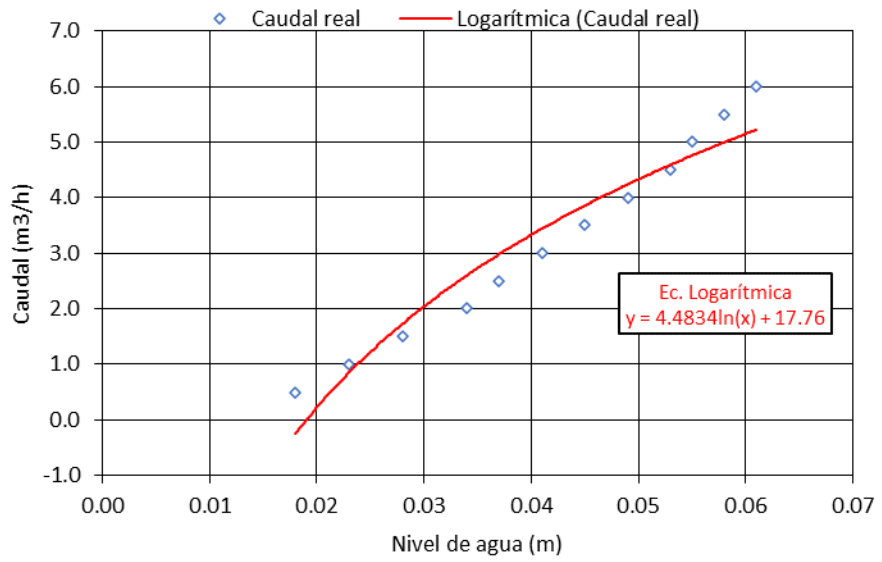
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente s=2%.

Q = 4.4834 * Ln(H) + 17.76

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 69 la distribución logarítmica entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente de 2%.

Figura 69

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución logarítmico de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo logarítmico, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

AJUSTE ESTADÍSTICO DE MODELO EXPONENCIAL.

Expresamos el caudal experimental mediante una ecuación de tipo exponencial, cuya expresión es: $Q = a * (e)^{bx}$

Para obtener los factores a y b se calcula el logaritmo neperiano de la variable Q y H, luego se grafica la regresión lineal.

Tabla 39

Datos de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.

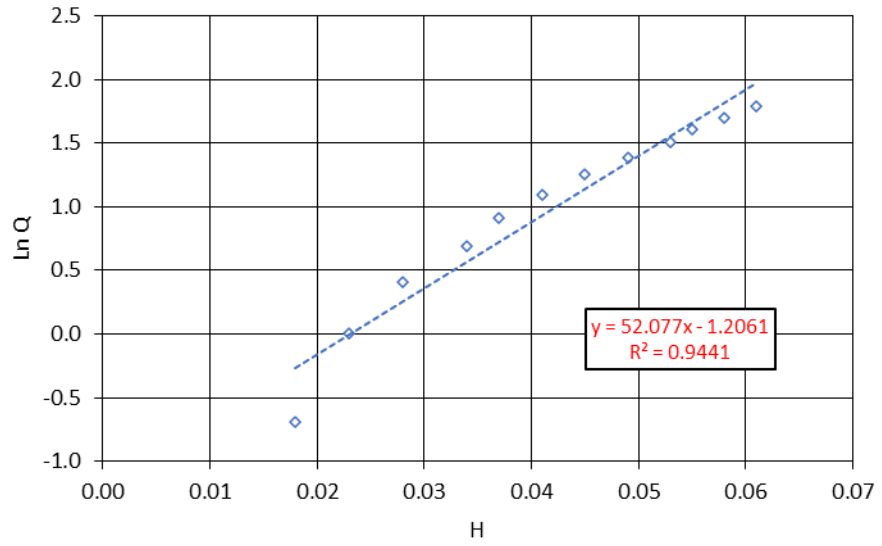
Ensayo N°	Caudal Q (m3/h)	Altura H (m)	H (X)	Ln Q (Y)
1	6.0	0.067	0.067	1.79
2	5.5	0.063	0.063	1.70
3	5.0	0.061	0.061	1.61
4	4.5	0.058	0.058	1.50
5	4.0	0.055	0.055	1.39
6	3.5	0.051	0.051	1.25
7	3.0	0.047	0.047	1.10
8	2.5	0.043	0.043	0.92
9	2.0	0.039	0.039	0.69
10	1.5	0.034	0.034	0.41
11	1.0	0.027	0.027	0.00
12	0.5	0.02	0.02	-0.69

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calculado los logaritmos de Q y H en la Tabla 39, se grafica su distribución y se traza la línea de tendencia lineal.

Figura 70

Gráfica de ajuste para modelo exponencial de vertedero semicircular de pendiente s=2%.



Fuente: Elaboración propia.

De la ecuación de la recta, se determina el valor de b y c para calcular el valor de a:

b = 52.077

$c = (\sum Y - b * \sum X) / n$

$c = -14.4734 / 12$

$c = -1.2061$

$a = e^{c}$

a = 0.2994

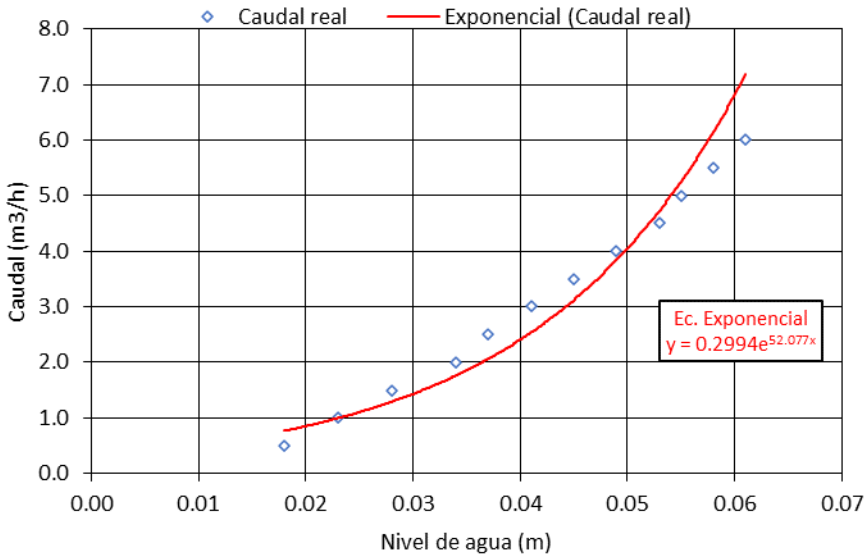
Encontrando los valores de a y b, se tiene la ecuación logarítmica generada para el vertedero de pared delgada tipo semicircular en canal rectangular con pendiente de 2%.

$Q = 0.2994\ (e)^{52.077\ (H)}$

Con los resultados calculados se grafica en la Figura 71, la distribución exponencial entre el nivel de agua y el caudal medido en vertedero semicircular con pendiente s=2%.

Figura 71

Comparativo entre caudal real y modelo de distribución exponencial de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.



Nota. Las ecuaciones que se muestran en la gráfica corresponden a una distribución de los datos de tipo exponencial, donde "y" es el caudal y "x" es la altura del nivel de agua. Fuente: Elaboración propia.

Obtenido los modelos de distribución estadística se presenta la siguiente tabla:

Tabla 40

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.

N°	X Altura H (m)	Y Caudal Q (m3/h)	Dist. Potencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Error	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	0.061	6.00	5.8144	0.0345	7.5625	-
2	0.058	5.50	5.2519	0.0616	5.0625	-
3	0.055	5.00	4.7183	0.0794	3.0625	-
4	0.053	4.50	4.3785	0.0148	1.5625	-
5	0.049	4.00	3.7374	0.0690	0.5625	-
6	0.045	3.50	3.1474	0.1243	0.0625	-
7	0.041	3.00	2.6085	0.1533	0.0625	-
8	0.037	2.50	2.1205	0.1440	0.5625	-
9	0.034	2.00	1.7880	0.0450	1.5625	-
10	0.028	1.50	1.2085	0.0850	3.0625	-
11	0.023	1.00	0.8126	0.0351	5.0625	-
12	0.018	0.50	0.4956	0.0000	7.5625	-
Suma	**0.5020**	**39.0000**	**36.0816**	**0.8457**	**35.7500**	**34.9043**
Varianza	**0.0002**	**2.9792**	**2.9226**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**0.0418**	**3.2500**	**3.0068**		**R^2 =**	**0.9763**

Fuente: Elaboración propia.

(Continúa…)

Tabla 40

Ajuste de bondad para distribución de datos obtenidos de ensayos de vertedero de pared delgada tipo semicircular de pendiente s=2%.

N°	Dist. Logarítmica Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión	Dist. Exponencial Y' Valor esperado (m3/h)	SCE $(Y'-Y)^2$ Suma de cuadrados debido al Err.	STC $(Y'-Ym)^2$ Suma total de cuadrados	SCR Suma de cuadrados debido a la regresión
1	5.0636	0.8769	7.5625	-	6.4305	0.1853	7.5625	-
2	4.8294	0.4497	5.0625	-	5.5098	0.0001	5.0625	-
3	4.5827	0.1741	3.0625	-	4.7209	0.0779	3.0625	-
4	4.4107	0.0080	1.5625	-	4.2588	0.0582	1.5625	-
5	4.0463	0.0021	0.5625	-	3.4659	0.2853	0.5625	-
6	3.6508	0.0228	0.0625	-	2.8206	0.4616	0.0625	-
7	3.2185	0.0478	0.0625	-	2.2954	0.4964	0.0625	-
8	2.7418	0.0585	0.5625	-	1.8680	0.3994	0.5625	-
9	2.3491	0.1219	1.5625	-	1.6006	0.1595	1.5625	-
10	1.4475	0.0028	3.0625	-	1.1751	0.1056	3.0625	-
11	0.5340	0.2172	5.0625	-	0.9083	0.0084	5.0625	-
12	-0.6043	1.2195	7.5625	-	0.7021	0.0408	7.5625	-
Suma	**36.2702**	**3.2012**	**35.7500**	**32.5488**	**35.7560**	**2.2785**	**35.7500**	**33.4715**
Varianza	**2.9694**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**	**3.2983**		**Coef. R^2**	**SCR / STC**
Promedio	**3.0225**		**R^2 =**	**0.9105**	**2.9797**		**R^2 =**	**0.9363**

Fuente: Elaboración propia.

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL (CFD) DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR.

En la Tabla 41 se muestra los resultados del análisis de la simulación computacional (CFD) en los vertederos trapezoidal y semicircular, en un modelo geométrico del canal de ensayo rectangular de 86 mm x 300 mm.

Tabla 41

Simulación computacional de vertedero trapezoidal y semicircular de pared delgada.

Tipo de vertedero	Pendiente del canal (%)	Caudal (m^3/h)	Caudal teórico (m^3/h)	Coeficiente de gasto de vertedero
Trapezoidal	1	6	8.713	0.6886
Trapezoidal	1	5.5	8.065	0.6820
Trapezoidal	1	5	7.381	0.6774
Trapezoidal	1	4.5	6.737	0.6680
Trapezoidal	1	4	6.055	0.6606
Trapezoidal	1	3.5	5.383	0.6502
Trapezoidal	1	3	4.694	0.6392
Trapezoidal	1	2.5	3.985	0.6274
Trapezoidal	1	2	3.271	0.6114
Trapezoidal	1	1.5	2.543	0.5900
Trapezoidal	1	1	1.756	0.5696
Trapezoidal	1	0.5	0.954	0.5243
Trapezoidal	1.5	6	8.272	0.7253
Trapezoidal	1.5	5.5	7.718	0.7126
Trapezoidal	1.5	5	7.148	0.6995
Trapezoidal	1.5	4.5	6.516	0.6906
Trapezoidal	1.5	4	5.951	0.6721
Trapezoidal	1.5	3.5	5.322	0.6577
Trapezoidal	1.5	3	4.704	0.6377
Trapezoidal	1.5	2.5	4.054	0.6166
Trapezoidal	1.5	2	3.398	0.5886
Trapezoidal	1.5	1.5	2.687	0.5582
Trapezoidal	1.5	1	1.905	0.5250
Trapezoidal	1.5	0.5	1.079	0.4635
Trapezoidal	2	6	8.229	0.7291
Trapezoidal	2	5.5	7.687	0.7155
Trapezoidal	2	5	7.057	0.7085
Trapezoidal	2	4.5	6.450	0.6977
Trapezoidal	2	4	5.827	0.6864
Trapezoidal	2	3.5	5.218	0.6707
Trapezoidal	2	3	4.586	0.6542
Trapezoidal	2	2.5	3.927	0.6366
Trapezoidal	2	2	3.237	0.6179
Trapezoidal	2	1.5	2.532	0.5925
Trapezoidal	2	1	1.811	0.5522
Trapezoidal	2	0.5	0.993	0.5037

Tipo de vertedero	Pendiente del canal (%)	Caudal (m^3/h)	Caudal teórico (m^3/h)	Coeficiente de gasto de vertedero
Semicircular	1	6	5.073	1.1828
Semicircular	1	5.5	4.714	1.1668
Semicircular	1	5	4.332	1.1543
Semicircular	1	4.5	3.943	1.1412
Semicircular	1	4	3.547	1.1276
Semicircular	1	3.5	3.158	1.1083
Semicircular	1	3	2.758	1.0878
Semicircular	1	2.5	2.346	1.0657
Semicircular	1	2	1.920	1.0417
Semicircular	1	1.5	1.477	1.0154
Semicircular	1	1	1.030	0.9704
Semicircular	1	0.5	0.546	0.9160
Semicircular	1.5	6	4.909	1.2223
Semicircular	1.5	5.5	4.542	1.2110
Semicircular	1.5	5	4.155	1.2032
Semicircular	1.5	4.5	3.791	1.1870
Semicircular	1.5	4	3.407	1.1741
Semicircular	1.5	3.5	3.028	1.1559
Semicircular	1.5	3	2.640	1.1364
Semicircular	1.5	2.5	2.242	1.1153
Semicircular	1.5	2	1.831	1.0923
Semicircular	1.5	1.5	1.415	1.0603
Semicircular	1.5	1	0.977	1.0234
Semicircular	1.5	0.5	0.510	0.9796
Semicircular	2	6	4.796	1.2511
Semicircular	2	5.5	4.426	1.2426
Semicircular	2	5	4.053	1.2336
Semicircular	2	4.5	3.666	1.2274
Semicircular	2	4	3.294	1.2144
Semicircular	2	3.5	2.916	1.2004
Semicircular	2	3	2.531	1.1853
Semicircular	2	2.5	2.139	1.1688
Semicircular	2	2	1.731	1.1555
Semicircular	2	1.5	1.333	1.1253
Semicircular	2	1	0.913	1.0956
Semicircular	2	0.5	0.472	1.0596

Fuente: Elaboración propia.

En vertedero trapezoidal y canal con pendiente 1%: $Cd_{promedio} = 0.6324$

En vertedero trapezoidal y canal con pendiente 1.5%: $Cd_{promedio} = 0.6289$

En vertedero trapezoidal y canal con pendiente 2%: $Cd_{promedio} = 0.6471$

En vertedero semicircular y canal con pendiente 1%: $Cd_{promedio} = 1.0815$

En vertedero semicircular y canal con pendiente 1.5%: $Cd_{promedio} = 1.1301$

En vertedero semicircular y canal con pendiente 2%: $Cd_{promedio} = 1.1800$

4.1.2. Resultados de la prueba de hipótesis

PRUEBA DE NORMALIDAD

La prueba de normalidad de Shapiro Wilk se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos menores a 50, por tanto, se planteó la siguiente hipótesis:

HIPÓTESIS:

- Hipótesis H_0 = Los datos sí tienen una distribución normal.
- Hipótesis H_1 = Los datos no tienen una distribución normal.

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia (alfa) = 1%

Tabla 42

Prueba de Normalidad.

Variable	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sign.
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1%	0.96	12	0.85
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1.5%	0.97	12	0.87
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 2%	0.97	12	0.91
Caudal, presa semicircular y pendiente 1%	0.97	12	0.91
Caudal, presa semicircular y pendiente 1.5%	0.96	12	0.74
Caudal, presa semicircular y pendiente 2%	0.96	12	0.76

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, donde observamos la prueba de Shapiro-Wilk, en el estadístico hemos obtenido un nivel de significancia mayor al 1% (p-valor>0.01), lo que quiere decir, que se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula, es decir, los datos medidos si tienen una distribución normal.

Prueba T-Student.

Para probar si existen diferencias entre los grupos medidos, los caudales medidos con vertedero trapezoidal y los caudales medidos con vertedero semicircular en un canal con pendiente variable, recurrimos a la prueba T-Student. Primero definimos las suposiciones de la prueba.

CAUDAL DE PRESA TRAPEZOIDAL – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1% A 1.5%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia (alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1% a 1.5%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1% a 1.5%.

Tabla 43

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1%	12	4.97	2.55	0.74			
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1.5%	12	4.91	2.40	0.69			
Prueba de muestras emparejadas		0.06	0.18	0.05	1.08	11	0.303

Nota. Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 44

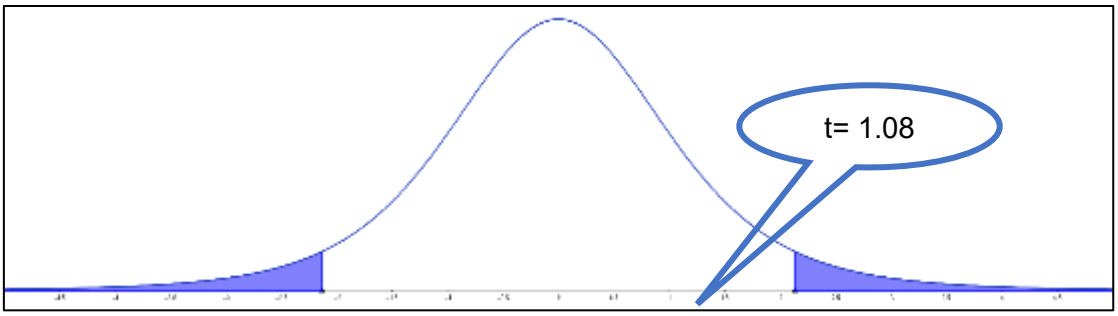
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Nota. El achurado es propio. Fuente: William S. Gosset.

Figura 72

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.



Nota. El valor T=1.08 cae en la zona de aceptación. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

De la Tabla 43, hemos observado que el valor T cae en la zona de aceptación, entonces, se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 1.5%.

CAUDAL DE PRESA TRAPEZOIDAL – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1.5% A 2%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia(alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1.5% a 2%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1.5% a 2%.

Tabla 45

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1.5%	12	4.91	2.40	0.69			
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 2%	12	4.81	2.40	0.69			
Prueba de muestras emparejadas		0.10	0.10	0.03	3.67*	11	0.004

Nota. *. El valor estadístico es significativo en el nivel 0.01 (2 colas). Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 46

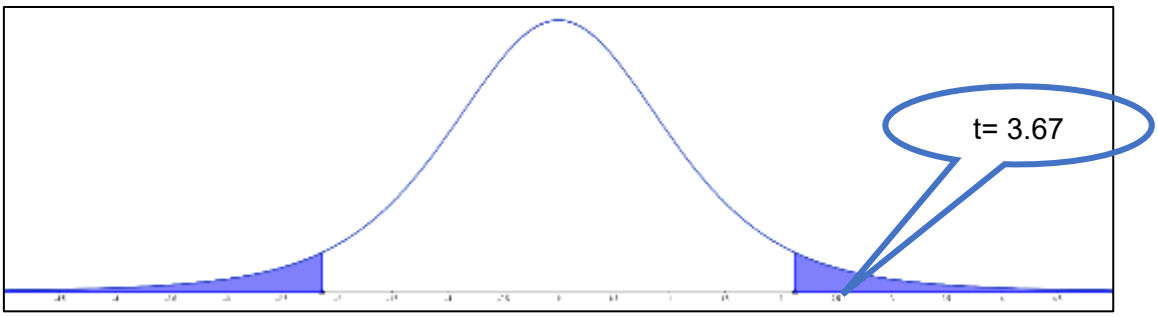
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Fuente: William S. Gosset.

Figura 73

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.



Nota. El valor T=3.67 cae en la zona de rechazo. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

De la Tabla 45, hemos observado que el valor T cae en la zona de rechazo, entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1.5% a 2%.

CAUDAL DE PRESA TRAPEZOIDAL – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1% A 2%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia(alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1% a 2%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero trapezoidal con variación de pendiente de 1% a 2%.

Tabla 47

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 1%	12	4.97	2.55	0.74			
Caudal, presa trapezoidal y pendiente 2%	12	4.81	2.40	0.69			
Prueba de muestras emparejadas		0.16	0.17	0.05	3.17*	11	0.009

Nota. *. El valor estadístico es significativo en el nivel 0.01 (2 colas). Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 48

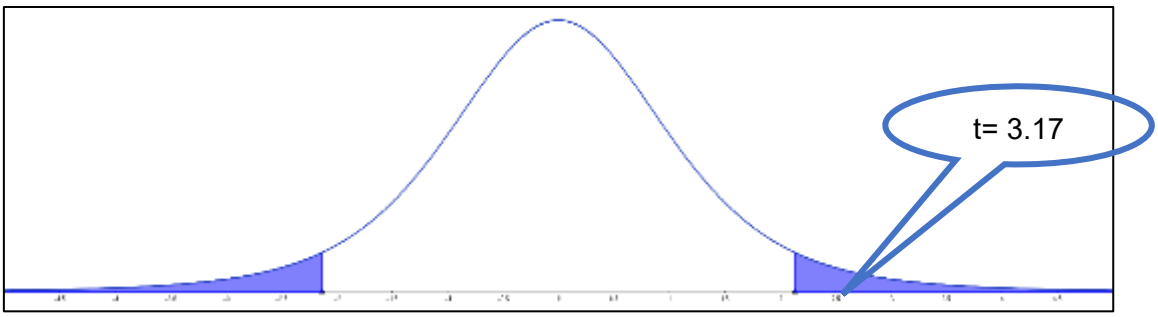
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Fuente: William S. Gosset.

Figura 74

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.



Nota. El valor T=3.17 cae en la zona de rechazo. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

De la Tabla 47, hemos observado que el valor T cae en la zona de rechazo, entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero trapezoidal con variación de pendiente 1% a 2%.

CAUDAL DE PRESA SEMICIRCULAR – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1% A 1.5%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia(alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1% a 1.5%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1% a 1.5%.

Tabla 49

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa semicircular y pendiente 1%	12	2.92	1.56	0.45			
Caudal, presa semicircular y pendiente 1.5%	12	2.81	1.52	0.44			
Prueba de muestras emparejadas		0.11	0.08	0.02	4.89*	11	0.000

Nota. *. El valor estadístico es significativo en el nivel 0.01 (2 colas). Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 50

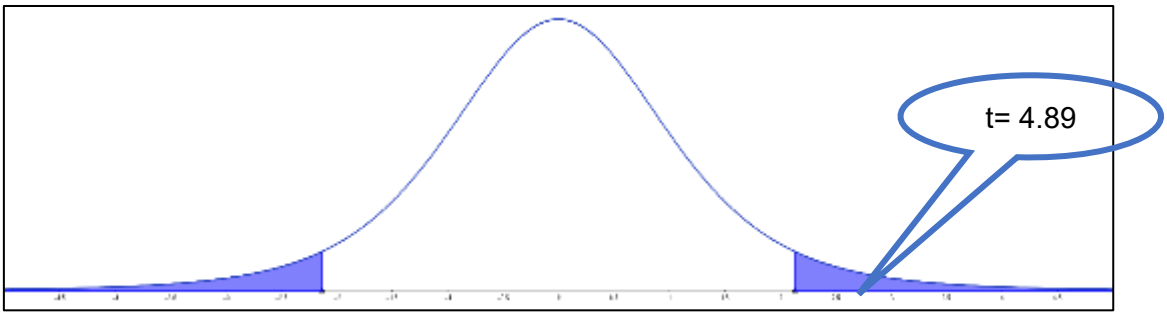
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Nota. El achurado es propio. Fuente: William S. Gosset.

Figura 75

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.



Nota. El valor T=4.89 cae en la zona de rechazo. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

De la Tabla 49, hemos observado que el valor T cae en la zona de rechazo, entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 1.5%.

CAUDAL DE PRESA SEMICIRCULAR – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1.5% A 2%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia(alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1.5% a 2%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1.5% a 2%.

Tabla 51

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa semicircular y pendiente 1.5%	12	2.81	1.52	0.44			
Caudal, presa semicircular y pendiente 2%	12	2.71	1.48	0.43			
Prueba de muestras emparejadas		0.10	0.07	0.02	4.81*	11	0.001

Nota. *. El valor estadístico es significativo en el nivel 0.01 (2 colas). Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 52

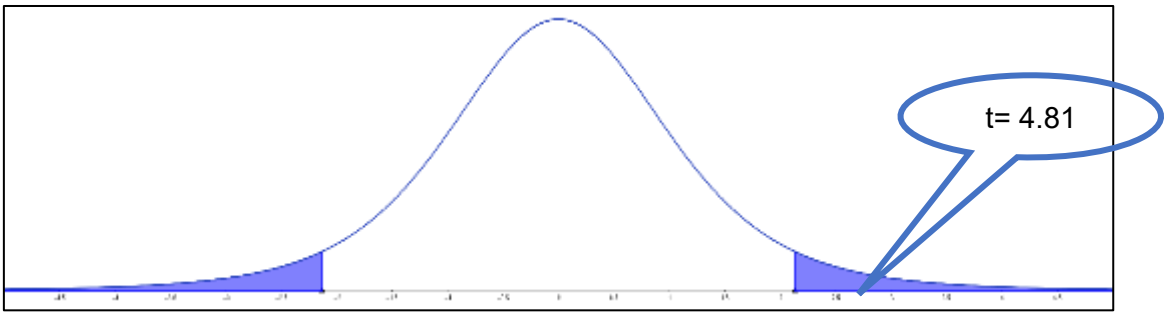
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Nota. El achurado es propio. Fuente: William S. Gosset.

Figura 76

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.



Nota. El valor T=4.81 cae en la zona de rechazo. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

De la Tabla 51, hemos observado que el valor T cae en la zona de rechazo, entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero semicircular con variación de pendiente 1.5% a 2%.

CAUDAL DE PRESA SEMICIRCULAR – VARIACIÓN DE PENDIENTE 1% A 2%

NIVEL DE SIGNIFICANCIA:

Confianza = 99%

Significancia(alfa) = 1%

PLANTEAMIENTO DE PRUEBA:

- Hipótesis H_0 = No existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1% a 2%.
- Hipótesis H_1 = Existe diferencia significativa entre la medición de caudal con vertedero semicircular con variación de pendiente de 1% a 2%.

Tabla 53

Resultados de la prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar	t	gl	Sign. (2 colas)
Caudal, presa semicircular y pendiente 1%	12	2.92	1.56	0.45			
Caudal, presa semicircular y pendiente 2%	12	2.71	1.48	0.43			
Prueba de muestras emparejadas		0.21	0.11	0.03	7.02*	11	0.000

Nota. *. El valor estadístico es significativo en el nivel 0.01 (2 colas). Resultados obtenidos del software PSPP.

Tabla 54

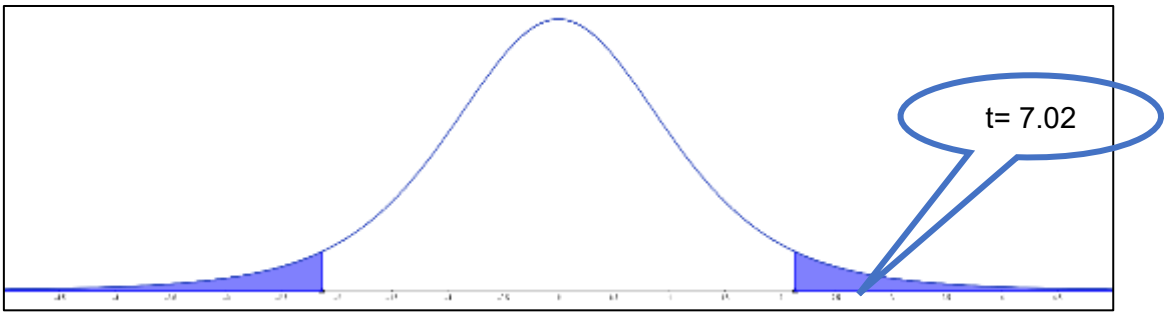
Valores porcentuales de la distribución T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.

Niveles de Significancia DOS COLAS									
	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43

Nota. El achurado es propio. Fuente: William S. Gosset.

Figura 77

Valor crítico (Vt) y zona de rechazo de prueba T-Student entre caudal de vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.



Nota. El valor T=7.02 cae en la zona de rechazo. Fuente: Elaboración propia.

$$Vt\ (1 - \alpha)_{(n-1)}$$

$$Vt\ (0.99)_{(11)} = 3.11$$

Vt = 3.11

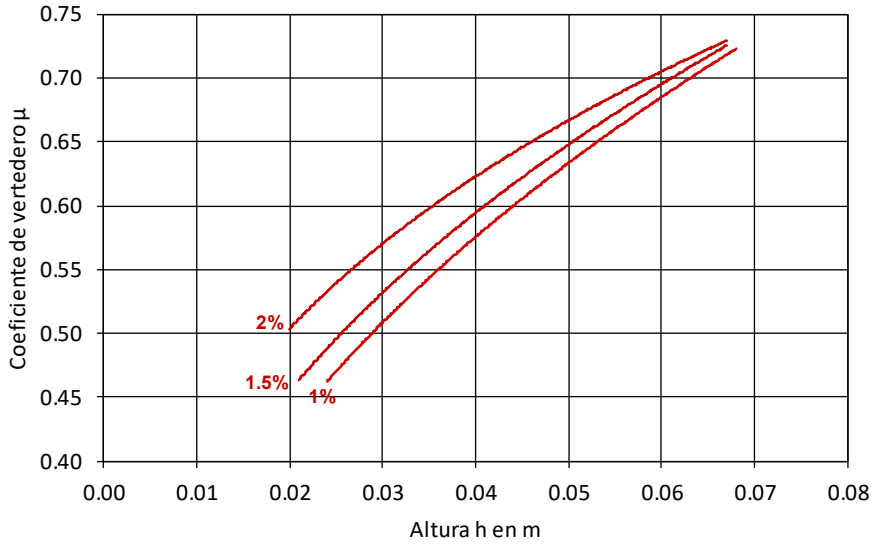
De la Tabla 53, hemos observado que el valor T cae en la zona de rechazo, entonces, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, es decir, existe diferencia significativa entre la medición de caudales con vertedero semicircular con variación de pendiente 1% a 2%.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos, válido para el rango de cargas 0.02<h<0.07, en la determinación del coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada trapezoidal en el canal de ensayo rectangular 86x300mm del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali. Los resultados de los ensayos experimentales, con una pendiente de 1.0%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=0.6324, con una pendiente de 1.5%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=0.6291, y con una pendiente de 2.0%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=0.6473, en comparación con los resultados de la modelación CFD se obtuvo una desviación porcentual menor a 0.01% en el vertedero trapezoidal, y una desviación porcentual en el rango de 0.1% a 2.8% en el vertedero semicircular.

Figura 78

Vertedero trapezoidal: coeficientes de vertedero para hw = 0.15 m.



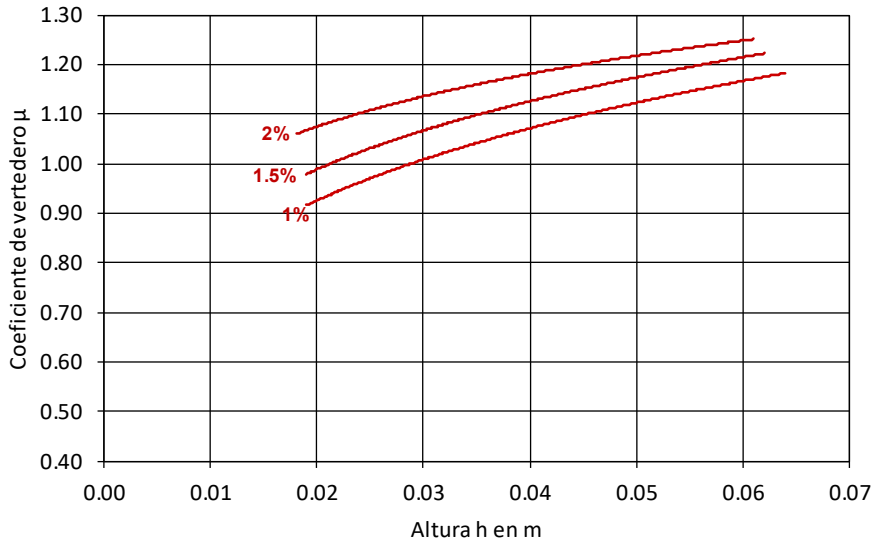
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 78 se observa las curvas de calibración generadas para determinar el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal, la cual es válida para hw = 0.15 m (altura de vertedero), en un rango de cargas de 0.02<h<0.07 y cuya geometría está adaptada al modelo propuesto por Cipolletti, con un ángulo lateral de 16.7° grados.

Por otro lado, en la determinación del coeficiente de gasto de vertedero de pared delgada semicircular en el canal de ensayo rectangular 86x300mm del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ucayali. Los resultados de los ensayos experimentales, con una pendiente de 1.0%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=1.0825, con una pendiente de 1.5%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=1.1322, y con una pendiente de 2.0%, se obtuvo un coeficiente de gasto promedio Cd=1.1820, en comparación con los resultados de la modelación CFD se obtuvo una desviación promedio en el rango de 0.1% a 2.8% en la variación ascendente del gasto.

Figura 79

Vertedero semicircular: coeficientes de vertedero para hw = 0.15 m.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 79 se observa las curvas de calibración generadas para determinar el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo semicircular, la cual es válida para hw = 0.15 m (altura de vertedero), en un rango de cargas de 0.02<h<0.07 y cuya geometría está adaptada a un diámetro de 0.06 m.

Se comparó los resultados obtenidos directamente con los valores propuestos por el manual y otros autores. El manual de laboratorio indica para el vertedero trapezoidal en un rango de 0.02<h<0.06 utilizar un Cd=0.654 con una pendiente mínima de 0.1%. En mi caso,

se alcanzó un rango de 0.02<h<0.07 y se determinó el Cd teniendo como pendiente tres valores (1%, 1.5% y 2%) y se obtuvo diferentes valores de Cd (0.63, 0.62, 0.64), calibrados y validados en función de la gradiente longitudinal del canal.

Adicionalmente, Navarro Escobar (2023) en su tesis “Evaluación experimental de los coeficientes de gastos en vertederos de pared delgada tipo: semicircular, parabólico, trapezoidal y sutro en canales rectangulares” indica que para cada presa el factor de gasto es diferente señalando para el trapezoidal Cd=0.92 y para el semicircular Cd=1.01 con una pendiente mínima de 0.1% del canal. En mi caso, se obtuvo diferentes valores ya que se incrementó significativamente la pendiente longitudinal del canal lo cual influye en la determinación del coeficiente de gasto, destacando que los resultados obtenidos son más representativos para las obras hidráulicas en la región que los valores comparados de la bibliografía clásica.

El rango de caudales de entrada en el canal de ensayo se desarrolló de acuerdo a las recomendaciones del fabricante en una escala de 0.5 m3/h hasta un límite de 6 m3/h, ya que si se sigue incrementando el caudal de entrada se corre el riesgo de que rebalse el agua por encima de las paredes laterales del canal de ensayo.

Se evaluó la influencia de la variación ascendente de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) del canal de ensayo rectangular, lo que demostró la causa del incremento significativo en los coeficientes de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular, es decir, los coeficientes de gasto de los vertederos trapezoidal y semicircular muestran una tendencia positiva al incrementar la pendiente longitudinal del canal de ensayo rectangular en ambos casos.

De acuerdo con la geometría del canal rectangular de pendiente variable, en mi caso tiene una sección transversal de 8.6 cm de ancho por 30 cm de altura de los muros laterales, con una longitud de 5 m en total, para este modelo de canal de ensayo a escala de laboratorio se verificó la funcionalidad de los vertederos trapezoidal y semicircular para medir y controlar el caudal del canal.

Con respecto a la metodología empleada para la simulación del modelo numérico, la modelación CFD fue validada de manera experimental y computacional, ya que en los resultados se puede observar una ligera desviación porcentual, sin embargo según el fabricante este margen se encuentra dentro del rango tolerable. Dicho esto, para evaluar computacionalmente los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular se consideró las fórmulas y parámetros indicados por el Ing. Villón Béjar y el manual de laboratorio G.U.N.T., así como la geometría de los vertederos, el trapezoidal su geometría se adaptó a las proporciones del modelo de Cipolletti y el semicircular se adaptó al diámetro y dimensiones del canal de ensayo, esta metodología permitió al estudio obtener resultados confiables y rápidos, pero fue necesario la guía de técnicos y expertos del tema.

Adicionalmente, esta metodología con técnicas computacionales es respaldada por antecedentes previos. En sus tesis de maestría, tanto Salazar Campoverde y Cedillo Chica (2017) como Ngamalieu (2015) utilizaron este enfoque. Estos precedentes sirvieron como base para llevar a cabo la fase de simulación computacional del modelo numérico.

CONCLUSIONES

- ✓ Se concluye que la modelación computacional de dinámica de fluidos (CFD) fue determinante para evaluar y obtener los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable, validado experimental y computacionalmente para un rango de cargas 0.02<h<0.07 en un canal de sección 86x300mm. El coeficiente de gasto promedio Cd obtenido de un rango de caudales de 0.5 a 6 m3/h, para el vertedero trapezoidal con una pendiente de 1% fue de 0.6324, con una pendiente de 1.5% fue de 0.6291, y con una pendiente de 2% fue de 0.6473; el Cd para el vertedero semicircular con una pendiente de 1% fue de 1.0825, con una pendiente de 1.5% fue de 1.1322 y con una pendiente de 2% fue de 1.1820.
- ✓ Se concluye que existe una relación significativa entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable, es decir, que en un rango de caudales donde se utiliza el vertedero, con un paso mínimo de 0.5 m3/h la relación entre el caudal teórico y el caudal real irá aumentando, por consecuencia también aumenta el coeficiente de gasto.
- ✓ Se concluye que sí influye la variación ascendente de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) del canal rectangular de pendiente variable, lo que causa el incremento de los coeficientes de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular, esta hipótesis se responde con las pruebas T-Student realizadas con las variables pendiente longitudinal y coeficiente de gasto, las pruebas revelan una diferencia significativa entre los coeficientes de gasto con pendientes variables, y se observa una tendencia positiva de los coeficientes de gasto al incrementar la pendiente longitudinal del canal de ensayo.

- ✓ Se concluye que existe una relación significativa entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular, donde se obtuvo una desviación porcentual menor a 0.01% en el vertedero trapezoidal, y una desviación porcentual en el rango de 0.1% a 2.8% en el vertedero semicircular, es decir, en este último se recomienda calibrar el modelo semicircular para reducir el margen de desviación y mejorar la precisión del modelo.

RECOMENDACIONES O SUGERENCIAS

- Se recomienda a los proyectistas y entidades locales de la Amazonia utilizar los coeficientes de gasto de vertederos presentados en este estudio para el diseño de vertederos de pared delgada trapezoidal y semicircular en la región amazónica por ser más representativos y validados experimentalmente.
- Se recomienda a la universidad la implementación de un canal de ensayo de mayor escala para validar experimentalmente los resultados modelados matemáticamente en un canal hidrodinámico de diferentes dimensiones, rugosidad y pendiente.
- Se sugiere para futuras investigaciones utilizar esta metodología CFD para desarrollar un estudio de optimización geométrica, es decir, variar otros factores como el ángulo de las paredes del vertedero trapezoidal (más allá de los ángulos estándar), el ángulo de inclinación del vertedero es decir un ángulo diferente al de 90°, o el radio del vertedero semicircular, buscando la geometría que ofrezca la mayor eficiencia hidráulica.
- Se recomienda para futuras investigaciones estudiar otros factores como la simulación de la rugosidad de la pared del canal y del vertedero, para evaluar de qué manera la rugosidad real de las estructuras de construcción civil de concreto armado y mampostería influye en el coeficiente de gasto en canales con pendiente variable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ángel Simón. (2018, marzo 15). El papel esencial del agua en la agenda 2030. *Fundación Aquae*. https://www.fundacionaquae.org/el-agua-y-su-papel-esencial-en-la-agenda-global/

Badules Martínez, J. (2023). *Aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el diseño y estudio de pulverizadores hidroneumáticos* [Tesis doctoral]. Universidad de Zaragoza, España. https://zaguan.unizar.es/record/127852/files/TESIS-2023-181.pdf

Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill.

David Darling. (2016). Habitable zone. *David Darling* (Traducido al español). https://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/habzone.html

Díaz Alarcón, A. G. (2020). *Modelación mediante software CFD de los ensayos de vertedero rectangular y triangular del canal hidráulico del laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás, Sede Villavicencio* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital de la Universidad Santo Tomás. http://hdl.handle.net/11634/29932

Fernández, A. D. (2008). *Canales de experiencias hidrodinámicas.* Gijón: Escuela Superior de la Marina Civil de Gijón.

García Martino, C. (2024). *Simulación CFD del comportamiento hidrodinámico de un barco bajo diferentes condiciones de oleaje*. Universidad de Oviedo. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/75889/TFG_CarlosGarciaMartino.pdf?sequence=4&isAllowed=y

G.U.N.T. (2015a). *HM 160*.30 *JUEGO DE VERTEDEROS DE CRESTA DELGADA 4 TIPOS* [Manual de experimentos]. G.U.N.T.: Gerätebau, Barsbüttel, Alemania.

G.U.N.T. (2015b). *HM 160 CANAL DE ENSAYO 86X300 MM* [Manual de experimentos]. G.U.N.T.: Gerätebau, Barsbüttel, Alemania.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill: México, D.F.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2023). Metodología de la investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (2ª ed.). McGraw-Hill: México, D.F.

López Fry, A. A. & Chung Benites, J. W. (2023). *Estudio experimental de un vertedero triangular y modelación con OPENFOAM* [Trabajo de suficiencia profesional]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/671014

Lux Monroy, M. A. (2010). *Medidores de flujo en canales abiertos.* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital de la Universidad de San Carlos de Guatemala: USAC. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf

Marbello Pérez, R. (2005). Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21725

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (1ª ed.). Editorial Macro: Lima, Perú.

Molina Domínguez, G. S. & Tafur Sánchez, A. P. (2023). *Análisis numérico y experimental del vertedero tipo Crump de tres crestas para un sistema de muestreo aguas arriba del puente del río Chilloroya en Cusco* [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. https://repositorio.urp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cd72708d-8d0f-4ac7-8e19-9d6bab9923fc/content

Navarro Escobar, A. M. (2024). *Evaluación experimental de los coeficientes de gastos en vertederos de pared delgada tipo: semicircular, parabólico, trapezoidal y sutro en canales rectangulares* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital de la Universidad Privada del Norte: UPN. https://hdl.handle.net/11537/36744

Ngamalieu Nengoue, U. A. (2015, julio). *Caracterización de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia, España. https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/80d52b0e-d50d-4abc-83ed-748fd26634c6/content

Organización Meteorológica Mundial (2008). *Guía de prácticas hidrológicas.* (6ª ed., Vol. I). OMM: Ginebra.

Pérez, R. M. (2005). *MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA.* Universidad Nacional de Colombia: Facultad de Minas. Medellín, Colombia.

Quishpe Songor, D. J. (2021). *Manual de prácticas virtuales de laboratorio, aplicando modelación numérica (CFD) para uso en las asignaturas de mecánica de fluidos e hidráulica aplicada* [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Quito. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20753

Rojas Morón, R. K. & Cajas Campos, E. A. J. (2023). *Análisis y evaluación del coeficiente de gasto en vertederos triangular y rectangular con contracción y sin contracción de pared delgada en canal de ensayo del laboratorio de Estructura e Hidráulica de la Universidad Nacional de Ucayali* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Ucayali, Perú. https://hdl.handle.net/20.500.14621/6240

Román Claros, W. G. (2018). *Pautas para elaborar proyecto de Tesis y trabajos de investigación en ingeniería, Parte I* (1ª ed.). Lima, Perú.

Salazar Campoverde, E. E. & Cedillo Chica, M. R. (2017). *Validación computacional de vertederos rectangulares y triangulares para generar un modelo nuevo triangular asimétrico que facilitaría la medición de las cargas en estructuras hidráulicas* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica Salesiana: Ecuador. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15009.

Sotelo Ávila, G. (2002). Hidráulica General (Vol. 1). México: Limusa Noriega Editores.

Taris Carrasco, A. S. (2023). *Diseño y construcción de una pista de aire lineal, con movimientos unidimensionales, para la implementación de equipos enfocados al macroproyecto del laboratorio de física de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato* [Tesis de maestría]. Repositorio Digital de la Universidad Técnica de Ambato: Ecuador. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/37102

Tesen Macazana, P. M. (2022). *Análisis del coeficiente de descarga en vertederos triangulares, rectangulares y trapezoidales en el laboratorio de hidráulica de la Universidad César Vallejo* [Tesis de pregrado]. Repositorio Digital de la Universidad César Vallejo, Chiclayo, Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12692/116217

ANEXOS

Anexo N°01 – Matriz de Consistencia

Título: “DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO EN VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE, APLICANDO MODELACIÓN CFD”.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala	Instrumento	Metodología
Problema General: ¿Cuáles son los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal rectangular de pendiente variable, aplicando modelación CFD? **Problemas Específicos:** -¿Cuál es la relación entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable? -¿Cómo influye la variación de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de un canal rectangular de pendiente variable en los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular? -¿Cuál es la relación entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular?	**Objetivo General:** Determinar los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable, aplicando modelación CFD. **Objetivos Específicos:** -Determinar la relación entre el nivel de agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable. -Evaluar la influencia de la variación de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de un canal rectangular de pendiente variable en los coeficientes de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular. -Determinar la relación entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular.	**Hipótesis General:** La modelación CFD es determinante para evaluar y obtener los coeficientes de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable. **Hipótesis Específicas:** -Existe una relación significativa entre el nivel del agua y el coeficiente de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en un canal rectangular de pendiente variable. -Influye la variación ascendente de la pendiente longitudinal (1%, 1.5% y 2%) de un canal rectangular de pendiente variable, lo que causa el incremento de los coeficientes de gasto en vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular. -Existe una relación significativa entre los coeficientes de gasto experimental y computacional mediante modelación CFD para los vertederos de pared tipo trapezoidal y semicircular.	**Variable independiente:** Modelo de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular en canal de ensayo rectangular	Caudal de entrada	Volumen Tiempo Caudal	Razón continua	Caudalímetro, recipiente y cronómetro	**Tipo:** Aplicado **Enfoque:** Cuantitativo **Nivel** Descriptivo-exploratorio **Diseño** Experimental de laboratorio de corte transversal **Población** Todos los posibles ensayos en canales rectangulares con vertederos trapezoidal y semicircular **Muestra** 72 ensayos experimentales en vertederos trapezoidal y semicircular
				Pendiente longitudinal	Inclinación longitudinal del canal en rango: 1%, 1.5%, 2%	Nominal	HM 160 Canal de ensayo 86x300mm	
				Geometría	Dimensión del canal Dimensión del vertedero	Nominal	Flexómetro y regla metálica	
				Nivel de aguas arriba	Altura de agua sobre la cresta del vertedero	Razón continua	Regla metálica	
			Variable dependiente: Coeficiente de gasto de vertederos de pared delgada tipo trapezoidal y semicircular	Caudal teórico	Caudal de vertedero trapezoidal Caudal de vertedero semicircular	Razón continua	Ecuación de Cipolletti y Villón Béjar	
				Coeficiente de gasto experimental	Relación experimental entre caudal real y caudal teórico	Razón continua	HM 160 Canal de ensayo 86x300mm	
				Coeficiente de gasto derivado de modelación CFD	Descarga del modelo hidráulico del vertedero (trapezoidal y semicircular)	Razón continua	Ansys Student 2025 R2	

Anexo N°02 – Ensayos de laboratorio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.0%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Diámetro de la presa (D)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.06	0.15	0.214	0.068
2	5.5			0.15	0.215	0.065
3	5			0.15	0.213	0.063
4	4.5			0.15	0.209	0.059
5	4			0.15	0.206	0.056
6	3.5			0.15	0.202	0.052
7	3			0.15	0.198	0.048
8	2.5			0.15	0.194	0.044
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.183	0.033
11	1			0.15	0.178	0.028
12	0.5			0.15	0.169	0.019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.0%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.064	5.415	1.10802854
2	5.5	0.06	4.819	1.14132753
3	5.0	0.057	4.392	1.13833752
4	4.5	0.054	3.984	1.12964999
5	4.0	0.051	3.593	1.11339071
6	3.5	0.047	3.100	1.12915647
7	3.0	0.043	2.639	1.13660789
8	2.5	0.039	2.213	1.12993426
9	2.0	0.035	1.820	1.09917274
10	1.5	0.031	1.461	1.02652041
11	1.0	0.025	0.991	1.00946047
12	0.5	0.019	0.603	0.82876072

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **1.0825289**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.5%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Diámetro de la presa (D)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.06	0.15	0.217	0.067
2	5.5			0.15	0.214	0.064
3	5			0.15	0.211	0.061
4	4.5			0.15	0.209	0.059
5	4			0.15	0.205	0.055
6	3.5			0.15	0.202	0.052
7	3			0.15	0.198	0.048
8	2.5			0.15	0.194	0.044
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.184	0.034
11	1			0.15	0.179	0.029
12	0.5			0.15	0.171	0.021

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.5%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.062	5.113	1.17345483
2	5.5	0.059	4.675	1.1765219
3	5.0	0.057	4.392	1.13833752
4	4.5	0.053	3.851	1.16845752
5	4.0	0.05	3.466	1.15395296
6	3.5	0.046	2.982	1.17390122
7	3.0	0.042	2.530	1.18597818
8	2.5	0.038	2.111	1.18423519
9	2.0	0.034	1.727	1.15828252
10	1.5	0.029	1.295	1.15799048
11	1.0	0.024	0.920	1.08673886
12	0.5	0.019	0.603	0.82876072

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **1.1322177**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**2.0%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Diámetro de la presa (D)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.06	0.15	0.217	0.067
2	5.5			0.15	0.213	0.063
3	5			0.15	0.211	0.061
4	4.5			0.15	0.208	0.058
5	4			0.15	0.205	0.055
6	3.5			0.15	0.201	0.051
7	3			0.15	0.197	0.047
8	2.5			0.15	0.193	0.043
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.184	0.034
11	1			0.15	0.177	0.027
12	0.5			0.15	0.17	0.02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA SEMICIRCULAR		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**2.0%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.061	4.965	1.20844572
2	5.5	0.058	4.533	1.21343136
3	5.0	0.055	4.118	1.21423161
4	4.5	0.053	3.851	1.16845752
5	4.0	0.049	3.342	1.19685789
6	3.5	0.045	2.865	1.22146195
7	3.0	0.041	2.422	1.23876161
8	2.5	0.037	2.012	1.2427003
9	2.0	0.034	1.727	1.15828252
10	1.5	0.028	1.216	1.23379671
11	1.0	0.023	0.852	1.17361246
12	0.5	0.018	0.547	0.91381756

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **1.1819881**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.0%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Anchura de la presa (bw)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.03	0.15	0.218	0.068
2	5.5			0.15	0.215	0.065
3	5			0.15	0.213	0.063
4	4.5			0.15	0.209	0.059
5	4			0.15	0.206	0.056
6	3.5			0.15	0.202	0.052
7	3			0.15	0.198	0.048
8	2.5			0.15	0.194	0.044
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.183	0.033
11	1			0.15	0.178	0.028
12	0.5			0.15	0.169	0.019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.0%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.068	8.732	0.68714953
2	5.5	0.065	8.033	0.68463634
3	5.0	0.063	7.585	0.65920785
4	4.5	0.059	6.728	0.6688643
5	4.0	0.056	6.120	0.65361341
6	3.5	0.052	5.355	0.65359943
7	3.0	0.048	4.642	0.64630205
8	2.5	0.044	3.980	0.62819849
9	2.0	0.039	3.223	0.62060076
10	1.5	0.033	2.417	0.62070741
11	1.0	0.028	1.829	0.54675873
12	0.5	0.019	0.962	0.51963977

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **0.6324398**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.5%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Anchura de la presa (bw)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.03	0.15	0.217	0.067
2	5.5			0.15	0.214	0.064
3	5			0.15	0.211	0.061
4	4.5			0.15	0.209	0.059
5	4			0.15	0.205	0.055
6	3.5			0.15	0.202	0.052
7	3			0.15	0.198	0.048
8	2.5			0.15	0.194	0.044
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.184	0.034
11	1			0.15	0.179	0.029
12	0.5			0.15	0.171	0.021

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		

EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**1.5%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.067	8.496	0.70625018
2	5.5	0.064	7.807	0.70445279
3	5.0	0.061	7.150	0.69933215
4	4.5	0.059	6.728	0.6688643
5	4.0	0.055	5.924	0.6752508
6	3.5	0.052	5.355	0.65359943
7	3.0	0.048	4.642	0.64630205
8	2.5	0.044	3.980	0.62819849
9	2.0	0.039	3.223	0.62060076
10	1.5	0.034	2.543	0.58979261
11	1.0	0.029	1.940	0.51535486
12	0.5	0.021	1.134	0.4410758

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **0.6290895**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**2.0%**

RECOLECCIÓN DE DATOS

Variable	Caudal de entrada (Q)	Ancho del canal (B)	Anchura de la presa (bw)	Altura de cresta (hw)	Nivel aguas arriba (h0)	Altura de agua (h)
Unidad	m^3/h	m	m	m	m	m
1	6	0.086	0.03	0.15	0.217	0.067
2	5.5			0.15	0.213	0.063
3	5			0.15	0.211	0.061
4	4.5			0.15	0.208	0.058
5	4			0.15	0.205	0.055
6	3.5			0.15	0.201	0.051
7	3			0.15	0.197	0.047
8	2.5			0.15	0.193	0.043
9	2			0.15	0.189	0.039
10	1.5			0.15	0.184	0.034
11	1			0.15	0.177	0.027
12	0.5			0.15	0.17	0.02

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INGENIERIA CIVIL

LABORATORIO DE ESTRUCTURA E HIDRAULICA

PROYECTO:	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA TIPO TRAPEZOIDAL Y SEMICIRCULAR EN CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR DE PENDIENTE VARIABLE	**FECHA:**	4/11/2025
SOLICITANTE:	JOSÉ GUILLERMO ARÉVALO CERRÓN		
UBICACIÓN:	DISTRITO DE MANANTAY, PROVINCIA DE CORONEL PORTILLO, DEPARTAMENTO DE UCAYALI		
EQUIPO:	HM 160 CANAL DE ENSAYO RECTANGULAR (86x300mm)		
VERTEDERO:	VERTEDERO DE PARED DELGADA TRAPEZOIDAL		
POSICIÓN DE LA PRESA EN EL RECORRIDO DE MEDICIÓN:	**1.89 m**	**PENDIENTE DEL CANAL:**	**2.0%**

RESULTADOS

Prueba N°	Q (m^3/h)	h (m)	Qt (m^3/h)	Cd
1	6.0	0.067	8.496	0.70625018
2	5.5	0.063	7.585	0.72512864
3	5.0	0.061	7.150	0.69933215
4	4.5	0.058	6.522	0.68998691
5	4.0	0.055	5.924	0.6752508
6	3.5	0.051	5.172	0.67674039
7	3.0	0.047	4.471	0.67091631
8	2.5	0.043	3.822	0.65410991
9	2.0	0.039	3.223	0.62060076
10	1.5	0.034	2.543	0.58979261
11	1.0	0.027	1.721	0.58121268
12	0.5	0.02	1.046	0.47783962

COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDERO: **0.6472634**

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS E HIDRÁULICA DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

LABORATORISTA	INGENIERO ENCARGADO DEL LABORATORIO	JEFATURA
Ing. ROSITA KATHERINE ROJAS MORÓN	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA	Dr. Ing. HORACIO SORIANO ÁLAVA

Anexo N°03 – Panel Fotográfico

Fotografía n.° 1



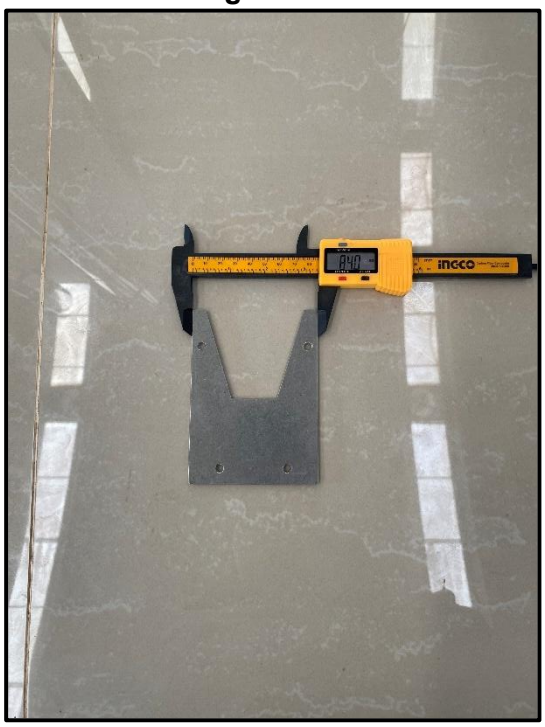
Se observa mantenimiento de tubería de succión del canal de ensayo.

Fotografía n.° 2



Se observa limpieza de tubería de succión del canal de ensayo.

Fotografía n.° 3



Se observa medición del ancho de la placa metálica trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 4



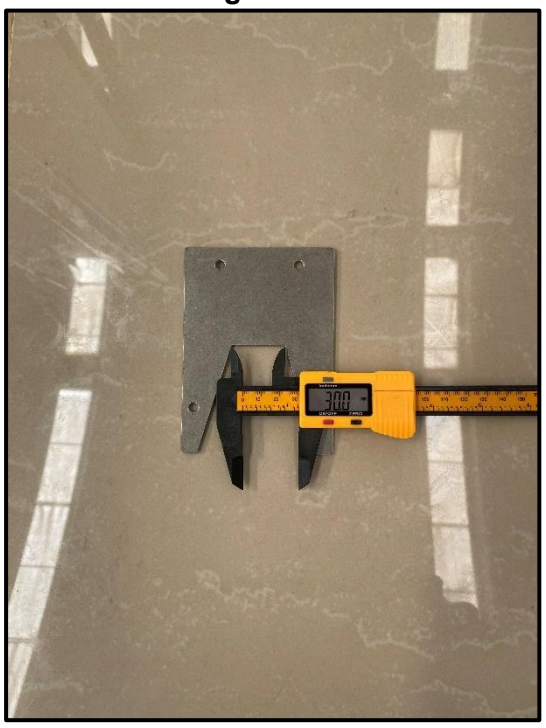
Se observa medición de altura de la placa metálica trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 5



Se observa medición del ancho de la abertura superior del vertedero metálico trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 6



Se observa medición del ancho de la cresta del vertedero metálico trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 7



Se observa medición del ancho de la cresta superior de la placa metálica trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 8



Se observa medición de la altura interior del hueco de placa metálica trapezoidal con vernier digital.

Fotografía n.° 9



Se observa medición del ancho de placa metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 10



Se observa medición de la altura de placa metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 11



Se observa medición de la altura de cresta de la presa metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 12



Se observa medición de la altura interior del hueco de presa metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 13



Se observa medición del ancho de la cresta superior de la pieza metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 14



Se observa medición del ancho de la abertura del hueco de vertedero metálico semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 15



Se observa medición del espesor de la placa metálica semicircular con vernier digital.

Fotografía n.° 16



Se observa los modelos físicos de vertederos de pared delgada de laboratorio calibrados.