

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS EN
LABERINTO UBICADO EN LA CIUDAD DE AREQUIPA**

Tesis presentada por el Bachiller:
Cáceres Rodríguez, David Berting
Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Asesor:
Mg. Ing. Rendón Dávila, Víctor Óscar

Arequipa- Perú
2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA CIVIL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 05 de Julio del 2021

Dictamen: 001174-C-EPIC-2021

Visto el borrador del expediente 001174, presentado por:

2010242411 - CACERES RODRIGUEZ DAVID BERTING

Titulado:

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS EN LABERINTO UBICADO
EN LA CIUDAD DE AREQUIPA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**1783 - HIDALGO VALDIVIA ALEJANDRO VICTOR
DICTAMINADOR**



**1950 - ARROYO AMBIA ARTURO FELIX
DICTAMINADOR**



**2592 - RENDON DAVILA VICTOR OSCAR
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

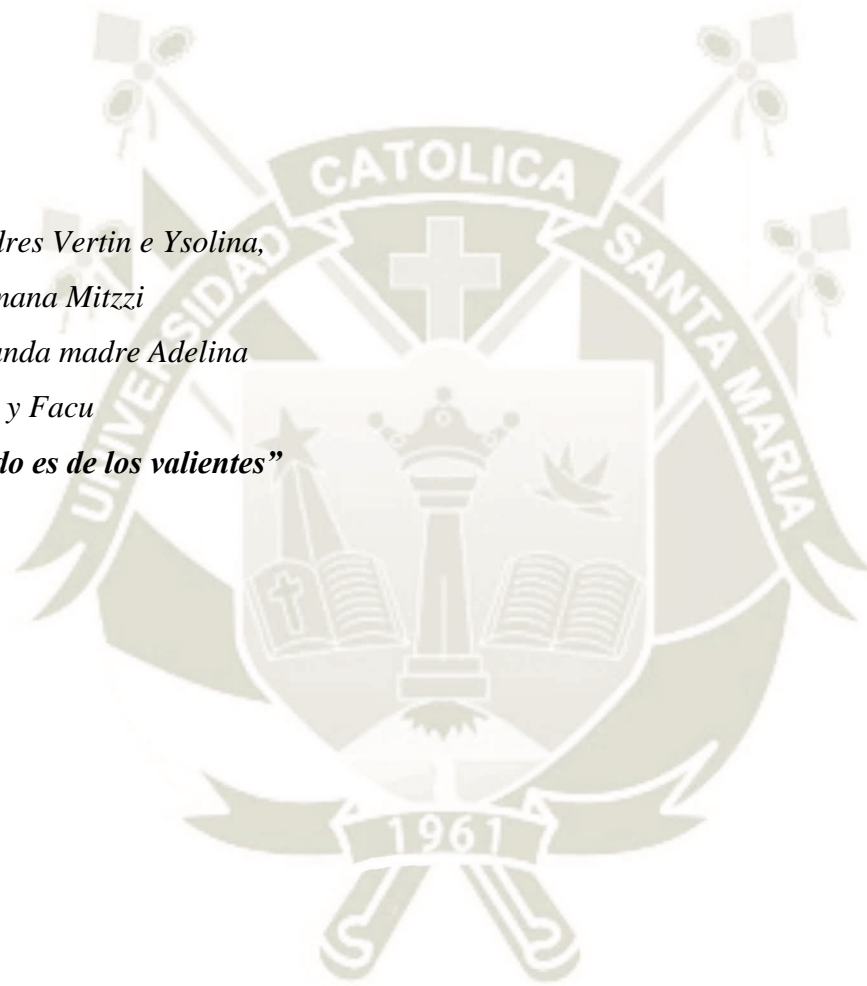
A mis padres Vertin e Ysolina,

A mi hermana Mitzzi

A mi segunda madre Adelina

A Andrea y Facu

“El mundo es de los valientes”



AGRADECIMIENTO

Es increíble cómo es que el tiempo pasa y no se detiene. Pueden suceder un millón de cosas a cada uno de nosotros, sin embargo, el mundo sigue girando y todo cambia alrededor. Quiero agradecer al tiempo y a Dios ya que aún me dan la oportunidad de seguir con vida y poder entender que nunca es tarde para empezar y acabar aquello que veías tan lejano.

A mis padres quienes adoro en demasía pues gracias a ellos puedo realizarme como persona y profesional; sin su apoyo, ejemplo, entendimiento, y buenos consejos, esto no sería posible. Además, por todo el esfuerzo y el empeño que han puesto en mí; ya que, ellos me criaron e inculcaron todos los valores que, hoy, me hacen un hombre de bien. Asimismo, me demuestran cada día que todo es posible si uno se lo propone.

A mi hermana Mitzzi, que con su alegría espontánea que me roba una sonrisa cuando las cosas parecen ser difíciles y me hace recordar la simplicidad de la vida en una carcajada.

A mi tía y segunda madre Adelina Rodríguez pues me demostró que las cosas pueden verse agobiantes pero que debemos luchar cada día con lo que nos tocó y con lo que tenemos. Ni más ni menos; pues, el mundo es de los valientes.

A Andrea y Facu que siempre me apoyan, dándome ánimos para seguir adelante en todo lo que me propongo, recibiendo siempre una palmada en la espalda para culminar lo que comienzo.

Al Ingeniero Víctor Rendón, por aceptar el reto de poder guiarme y ser el asesor de este proyecto y quién con su entusiasmo por la investigación hace posible este y muchos sueños más.

A todos con quienes pude hacer y compartir un poco de tiempo, con quienes estoy seguro hemos compartido muchas vivencias a Santiago, Arnold, Elard, Julián, Elda, José Carlos y espero poder seguir compartiendo

RESUMEN

A lo largo de la historia de la humanidad, el hombre ha buscado establecerse en lugares específicos para poder formar una comunidad y luego crear su propia civilización. Una de las problemáticas que pronto se presentaron fue el conseguir agua mientras crecía su población. Además, tener en cuenta que, las épocas de estiaje se prolongan durante largos períodos y los eventos naturales de efectos imprevistos son constantes y peligrosos. Éstos son algunos de los factores que posibilitan la construcción de estructuras que puedan retener, almacenar y abastecer de agua a la población de manera segura. Para lograr ello, se perfeccionaron los criterios de diseño y de estructuración y evitar fallos en la capacidad de descarga frente a eventos extraordinarios de la naturaleza. Se realizaron numerosas investigaciones en las estructuras de aliviaderos, buscando diferentes formas geométricas de diseño y estructuración para optimizar su capacidad de funcionamiento en presas de variadas características.

Es así, que, este proyecto, dirigido en pro de la investigación previa a la obtención del título de ingeniero civil, tiene como finalidad el análisis de las características y la capacidad de descarga de los aliviaderos en laberinto con relación a sus ángulos internos, altura de paramento y longitud de desarrollo de cresta del vertedero en que existen.

Los resultados obtenidos demuestran la relación que tienen los parámetros geométricos de diseño de los vertederos en laberinto con respecto a su capacidad de descarga; además de obtener características del flujo hidráulico aguas debajo de cada vertedero.

Palabras Clave: Vertederos en laberinto, caudal, altura de carga, lámina vertiente.

ABSTRACT

Throughout the history of humanity, it has sought to establish itself in specific places in order to form a community and then create its own civilization. One of the problems that soon arose was the fact of getting water while its population was growing, in addition to taking into account that there are times of low water and natural events of unforeseen effects, these are some of the factors that make possible the idea of making structures that they can retain, store and supply water to the people but safely. For this, the design and structuring criteria were perfected so that they do not fail in terms of their discharge capacity in the face of extraordinary events in nature. For this, investigations were carried out on the spillway structures, seeking different geometric shapes in design and structures. to optimize its operating capacity in different dams.

Thus, this project, directed towards research prior to obtaining the title of civil engineer, aims to analyze the characteristics and discharge capacity of labyrinth spillways in relation to their internal angles, height face and crest development length of the spillway in which they exist.

The results obtained demonstrate the relationship that the geometric design parameters of labyrinth landfills have with respect to their discharge capacity; in addition to obtaining characteristics of the hydraulic flow downstream of each spillway.

Key Words: Labyrinth dumps, flow, water loading height, nape.

INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación es necesario para comprender el funcionamiento hidráulico de los vertederos en laberinto. El vertedero en laberinto es una estructura funcional del aliviadero; el mismo que mide los caudales de descarga y a la vez disminuye la presión hidráulica producto de la velocidad media conseguida por la pendiente del canal. Su geometría se caracteriza por emplear diferentes ángulos de abertura, consiguiendo una longitud de desarrollo necesaria máxima y otra mínima con las cuáles se puede llegar a deducir una eficiencia máxima de descarga y una altura de carga sobre la cresta máxima de manera tal, que, no se comporte como un vertedero recto. El número de ciclos presentes en la estructura es determinante para observar el funcionamiento óptimo de la misma.

El vertedero en Laberinto es poco conocido en investigación a pesar de su funcionalidad como reemplazo de vertederos sin la capacidad de descarga deseada. De presentarse un fenómeno de extrema magnitud las descargas en el aliviadero podrían superar a la diseñada. Es por ello que, el vertedero en laberinto, al poseer mayor longitud de desarrollo que el vertedero convencional, se adapta mejor al diseño más óptimo del mismo.

INDICE

DICTAMEN APROBATORIO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO.....	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
INTRODUCCION.....	VI
INDICE.....	VII
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Identificación.....	2
1.2. Descripción	2
2. DISEÑO TEÓRICO.....	3
2.1. Justificación.....	3
2.2. Problema	3
3. OBJETO.....	4
3.1. Campo de estudio	4
3.1.1. Objetivo	4
3.1.1.1. Objetivo General.....	4
3.1.1.2. Objetivos específicos	4
4. HIPÓTESIS.....	6

5. ESTRUCTURA Y CONTENIDO GENERAL	6
CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEORICO.....	7
1. ANTECEDENTES	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Conceptos.	9
2.2. Presa.....	9
2.2.1. Clasificación de presas	9
2.2.1.1. Partes de una presa	11
2.2.2. Aliviaderos.	11
2.2.2.1. Partes de un Aliviadero.....	12
2.2.2.1.1. Estructuras de control:	12
2.2.2.1.1.1. Canal de desagüe:	12
2.2.2.1.2. Estructuras terminales:.....	12
2.2.2.1.3. Canales de toma y desagüe:	12
2.3. Flujo	13
2.3.1. Clasificación de Flujos	13
2.3.1.1. Flujo permanente y no permanente.	13
2.3.1.2. Flujo uniforme y variado.	14
2.3.1.2.1. Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional.....	14
2.3.1.2.2. Flujo Laminar o turbulento	15
2.3.1.2.3. Flujo subcrítico, crítico y supercrítico	16
2.4. Elementos para el diseño de un vertedero.....	19
2.4.1. Paramento o altura del vertedero (P)	19
2.4.2. Ancho del vertedero (W)	19
2.4.3. Longitud del vertedero (L)	19
2.4.4. Altura de carga (h).....	19
2.5. Clasificación de Vertederos	20
2.5.1. Clasificación por la forma del vertedero:	20
2.5.1.1. Clasificación por el tipo de Pared:.....	22
2.5.1.1.1. Vertederos de pared delgada.....	22
2.5.1.1.2. Vertederos de pared gruesa.....	23
2.5.1.2. Clasificación por el nivel de agua.....	23
2.5.1.2.1. Vertedero Libre.....	23
1.5.1.2.2. Vertedero Sumergido.....	24

2.6. Tipos de vertederos.....	25
2.6.1. Vertederos de Cimacio	25
2.6.2. Vertedero en rápida	26
2.6.3. Vertederos en Sifón	27
2.6.4. Vertederos en caída libre	29
2.6.5. Cortinas vertedoras con caída rápida.....	30
2.6.6. Vertederos con canal latera.....	31
2.6.7. Vertederos con tiro vertical	32
2.6.8. Vertederos dentados	32
2.6.9. Vertederos en abanicos.....	33
2.6.10. Vertederos de túnel.....	34
2.6.11. Vertederos circulares o morning glory	35
2.6.12. Vertederos con descarga directa al canal.....	37
2.6.13. Vertederos en tecla de piano.....	38
2.7. Fórmulas utilizadas para la estimación de coeficientes de descarga	38
2.7.1. Fórmula de King.....	38
2.7.2. Fórmula de Francis	39
2.7.3. Fórmula de Rehbock.....	39
2.7.4. Fórmula de Kindsvater y Carter	40
2.7.5. Fórmula de Bazin	40
2.7.6. Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos	41
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	42
1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	43
2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
2.1. Vertederos en laberinto.....	43
2.2. Perfil de Cresta	45
2.3. Coeficientes de descarga	46
2.4. Ahogamiento del vertedero y las interferencias entre láminas vertientes.....	50
2.4.1. Ahogamiento del vertedor	51
2.4.2. Interferencia de la lámina vertiente	52
2.5. Fenómeno de aireación.....	62
2.5.1. La necesidad de aireación.....	62
2.5.2. El problema de Cavitación.	64
2.5.3. Aireación de los vertedores	67

2.6.	Curvas de diseño.....	71
2.7.	Geometría de los vertederos en laberinto.....	83
2.8.	Diseño Hidráulico del vertedero en laberinto	86
2.8.1.	Parámetros de diseño	86
2.8.1.1.	Pautas generales para la selección de parámetros	86
2.9.	Metodología.....	92
2.10.	Diseño Geométrico definitivo.	93
2.10.1.	Modelo Piloto de 3 ciclos y 10 Grados de abertura.....	93
2.11.	Construcción e instalación	94
2.11.1.	Descripción del Canal hidrodinámico	95
2.11.1.1.	Estructuras del canal	95
2.11.1.1.1.	Pozo de disipación	95
2.11.1.1.2.	Canal hidrodinámico.....	97
2.11.1.1.3.	Canal aguas abajo	98
2.11.1.2.	Equipos anexos al Canal.....	98
2.11.1.2.1.	Motobombas de agua.....	98
2.11.1.2.2.	Sistema de Succión y alimentación	99
2.11.1.2.3.	Piscina de alimentación y almacenamiento	100
2.11.1.3.	Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos SCADA	100
2.11.1.3.1.	Datalogger.....	100
2.11.1.3.2.	Periféricos	101
2.11.2.	Construcción, instalación y habilitación de los vertederos en laberinto	101
2.11.1.3.	Modelos de vertederos en Laberinto	102
2.11.1.4.	Habilitación del vertedero en el canal hidrodinámico.....	104
2.11.1.5.	Materiales Utilizados.....	105
3.	MODELAMIENTO DE VERTEDEROS EN LABERINTO.....	107
3.1.	Medición de variables físicas.	107
3.3.	Obtención, proceso y calculo de datos	108
3.3.1.	Vertederos en Laberinto.	108
3.3.1.1.	Modelo 1: Angulo de 10°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m.	108
3.3.1.2.	Modelo 2: Angulo de 10°, Nro. de ciclos = 02, P = 0.11 m.	110
3.3.1.3.	Modelo 3: Angulo de 10°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m.	112
3.3.1.4.	Modelo 4: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m.	113
3.3.1.5.	Modelo 5: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 02, P = 0.11 m.	115
3.3.1.6.	Modelo 6: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m.	117

3.3.1.7. Modelo 7: Angulo de 20°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m. 118
3.3.1.8. Modelo 8: Angulo de 20°, Nro. de ciclos = 02, P = 0.11 m. 120
3.3.1.1. Modelo 9: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m. 121

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES 173

1. Análisis de Resultados 174

1.1. Curvas de Gasto H_0/Q 174

1.2. Curvas de diseño para gasto $(C_d/H_0/P)$ 176

**2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL VERTEDERO EN LABERINTO
182**

2.1. Interferencia de láminas y sumersión local 182

CONCLUSIONES 185

RECOMENDACIONES 187

REFERENCIAS 188

ANEXOS 191

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flujo bidimensional.....	15
Figura 2 Ejemplo de Flujo bidimensional	15
Figura 3 flujo crítico, subcrítico y supercrítico	18
Figura 4 Vertedero en laberinto vista frontal y lateral.....	20
Figura 5 Figura 1 vertedero trapezoidal	21
Figura 6 Vertedero de perfil circular	21
Figura 7 Vertedero de pared delgada.....	22
Figura 8 Vertedero de pared gruesa, vista latera	23
Figura 9 Vertedero en laberinto, aguas abajo	24
Figura 10 Vertedero sumergido.....	24
Figura 11 Vertedero Cimacio	25
Figura 12 Vertedero de Cimacio	26
Figura 13 Vertedero en rápida Fuente: Dr. Mariano R. Martínez Menes, 2010	27
Figura 14 Esquema de vertedero sifón típico	28
Figura 15 Tipos de vertederos sifón	29
Figura 16 Características del flujo en una estructura de caída	30
Figura 17 Cortinas vertedoras con caída rápida.....	30
Figura 18 Esquema de vertedero con canal lateral	31
Figura 19 Vertedero dentado en la presa de Cobconully, Washintong	32
Figura 20 Partes que constituyen un vertedor en abanico.	34
Figura 21 Partes que constituyen un vertedero de túnel.....	35
Figura 22 Aliviadero tipo Morning Glory de la presa de Monticello.....	36
Figura 23 Componentes de vertedero en pozo	37
Figura 24 Vertedores con descarga directa en canal	37
Figura 25 Vertedores en tecla de piano	38
Figura 26 Vista en planta de vertederos en laberinto.	45
Figura 27 Perfiles de cresta utilizados comúnmente en los vertederos de laberinto.	46

Figura 28 Coeficiente de descarga para un perfil de cuarto de redondeo, par un vertedero lineal	48
Figura 29 Condiciones de flujo.	48
Figura 30 Perfiles de vertido sobre el vertedero.	51
Figura 31 Límite de ahogamiento de un vertedero en laberinto.	52
Figura 32 Interferencia de láminas vertientes.	53
Figura 33 Influencia del numero de ciclos en la interferencia de la lámina vertiente.	53
Figura 34 Interferencia de la lámina vertiente.	54
Figura 35 Interferencia de la lámina vertiente.	54
Figura 36 Definicipon de las longitudes de perturbación.	57
Figura 37 Distribución de Cd (l) a lo largo de la cresta después de Indlekofer, H., y Rouve, G.,	59
Figura 38 Dependencia de la reducción del coeficiente de descarga no dimensional en el ángulo de la pared lateral de Indlekofer, H., y Rouve, G., (1975)	59
Figura 39 Variables definidas del vertedero en laberinto trapezoidal	60
Figura 40 Representación gráfica de los efectos de interferencia	61
Figura 41 Esquema de la Aireación debajo de la descarga del vertedero	63
Figura 42 Esquema de la variación de la carga de vaporización con la temperatura	65
Figura 43 Geometría de vertedores Fuente: Castellano, 2003.	67
Figura 44 Regiones de crecimiento de la capa límite y de aireación	68
Figura 45 Flujo en una ranura aireadora Fuente: Chanson, 1996.	71
Figura 46 Flujo en una ranura aireadora.	71
Figura 47 Curva de diseño para vertedero triangular de cresta plana con bisel	74
Figura 48 Curva de diseño para vertedero trapezoidal de cresta plana con bisel.	75
Figura 49 Curva de diseño de Darvas.	77
Figura 50 Curva de diseño de una cresta Ogee de Magalhães y Lorena.	78
Figura 51 Curva de diseño para vertedero triangular de Lux y Hinchliff.	80
Figura 52 Curva de diseño para vertedero trapezoidal de Lux y Hinchliff.	81
Figura 53 Curva de diseño para vertedero triangular con perfil de cresta de cuarto de redondeo.	82
Figura 54 Vista en planta del vertedero en laberinto.	84

Figura 55 Vista de un vertederos en laberinto, Presa lake Brazos	85
Figura 56 Geometría del vertedero en laberinto	85
Figura 57 Geometría del modelo piloto.....	93
Figura 58. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10°, 01 ciclos, P= 0.185m)	109
Figura 59. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10°, 02 ciclos, P= 0.11m)	111
Figura 60. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10°, 03 ciclos, P= 0.075m)	113
Figura 61. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 01 ciclos, P= 0.185m)	114
Figura 62. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 02 ciclos, P= 0.11m)	116
Figura 63. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 03 ciclos, P= 0.075m)	117
Figura 64. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 01 ciclo, P= 0.185m)	119
Figura 65. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 02 ciclo, P= 0.11m)	121
Figura 66. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 03 ciclo, P= 0.075m)	122
Figura 67. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m	126
Figura 68. Gráfica de variación de perdida de energía vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	126
Figura 69. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	128
Figura 70. Gráfica de variación de perdida de energía vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	128
Figura 71. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	130

Figura 72. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	130
Figura 73. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m	132
Figura 74 Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m	132
Figura 75. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	134
Figura 76. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	134
Figura 77. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	136
Figura 78. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.75m.....	136
Figura 79 Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m	138
Figura 80. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	138
Figura 81. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	140
Figura 82. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m:	140
Figura 83. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	142
Figura 84. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	142
Figura 85. Puntos de toma de presiones en vertederos de 01 ciclo P= 0.185m.....	143
Figura 86. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m).....	145
Figura 87. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m).....	146
Figura 88. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m).....	146
Figura 89. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m).....	147

Figura 90. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)..... 147

Figura 91. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)..... 148

Figura 92. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m) 148

Figura 93. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,15° y P= 0.185m)..... 149

Figura 94. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,20° y P= 0.185m)..... 149

Figura 95. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)..... 150

Figura 96. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)..... 151

Figura 97. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)..... 151

Figura 98. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)..... 152

Figura 99. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)..... 152

Figura 100. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m).... 153

Figura 101. Puntos de toma de presiones en vertederos de 02 ciclos P= 0.11m 153

Figura 102. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 10 ° y P= 0.11m) 155

Figura 103. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 15 ° y P= 0.11m) 156

Figura 104. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m) 156

Figura 105. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos, 10 ° y P= 0.11m) ... 157

Figura 106. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m) 157

Figura 107. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m) 158

Figura 108. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 10 ° y P= 0.11m) 158

Figura 109. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 15 ° y P= 0.11m) 159

Figura 110. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m) 159

Figura 111. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclo, 10 ° y P= 0.11m)..... 160

Figura 112. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m) 160

Figura 113. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m) 161

Figura 114. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,10 ° y P= 0.11m) ... 161

Figura 115. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m) 162

Figura 116. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,20 ° y P= 0.11m) 162

Figura 117. Puntos de toma de presiones en vertederos de 03 ciclos P= 0.075m 163

Figura 118. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m) .. 165

Figura 119. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m) .. 165

Figura 120. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,20 ° y P= 0.075m) .. 166

Figura 121. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m) ..	166
Figura 122. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m) ..	167
Figura 123. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,20 ° y P= 0.075m) ..	167
Figura 124. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m) ..	168
Figura 125. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m....	168
Figura 126. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m) ...	169
Figura 127. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,10° y P= 0.075m) ...	170
Figura 128. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,15° y P= 0.075m) ...	170
Figura 129. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m) ...	171
Figura 130. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,10° y P= 0.075m) ...	171
Figura 131. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,15° y P= 0.075m) ...	172
Figura 132. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m) ...	172
Figura 133. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo P=.0185m.	174
Figura 134. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo P=.0185m.	175
Figura 135. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo P=.0185m.....	175
Figura 136. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185 176
Figura 137. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11 177
Figura 138. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m 177
Figura 139. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.11 178
Figura 140. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11 178
Figura 141. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m 179
Figura 142. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m 179
Figura 143. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m 180

Figura 144. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20° , 03 ciclos, $P= 0.075m$
..... 180

Figura 145. Rango de diseño ara vertederos de 01 Ciclo con grado grados de abertura
diferente ($10^\circ, 15^\circ$ y 20°) 181

Figura 146. Rango de diseño ara vertederos de 02 Ciclos con grado grados de abertura
diferente ($10^\circ, 15^\circ$ y 20°) 181

Figura 147. Rango de diseño ara vertederos de 03 Ciclos con grado grados de abertura
diferente ($10^\circ, 15^\circ$ y 20°) 182



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Determinación del coeficiente de gasto para vertedores rectangulares.....	56
Tabla 2 Determinación del coeficiente de gasto para vertedores triangulares.	57
Tabla 3 Método de diseño del vertedero en laberinto	72
Tabla 4 Coeficientes de la curva de diseño para vertederos de laberinto para vertedero triangular con perfil de cresta de cuarto de redondeo.....	83
Tabla 5 Consideraciones por algunos autores para el funcionamiento del vertedero en laberinto.....	90
Tabla 6 Parámetros para el diseño del modelo piloto de 03 ciclos -10 grados de abertura	94
Tabla 7 Rangos de entrada y salida en sensores de presión	108
Tabla 8. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclos, P= 0.185m.....	109
Tabla 9. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	110
Tabla 10. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	112
Tabla 11. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclos, P= 0.185m.....	114
Tabla 12. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	115
Tabla 13. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	117
Tabla 14. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	118
Tabla 15. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclo, P= 0.11m.....	120
Tabla 16. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 03 ciclo, P= 0.075m.....	122

Tabla 17. Coeficientes de la curva de diseño para vertederos en laberinto, perfil tipo Cuarto de redondeo.....	124
Tabla 18. Coeficientes polinomiales, Tullis modificado.....	124
Tabla 19. Valores hallados para los ángulos de 10°,15° y 20°.....	124
Tabla 20. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	125
Tabla 21. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 02 ciclo, P= 0.11m.....	127
Tabla 22. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	129
Tabla 23. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	131
Tabla 24. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	133
Tabla 25. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	135
Tabla 26. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m.....	137
Tabla 27. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m.....	139
Tabla 28. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 03 ciclos, P= 0.075m.....	141
Tabla 29. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 01 ciclo y P= 0.185.....	143
Tabla 30. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 02 ciclo y P= 0.11.....	154
Tabla 31. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 03 ciclos y P= 0.11.....	163

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Instalación de Vertederos en canal hidrodinámico	95
Fotografía 2. Pozo de disipación	95
Fotografía 3. Tuberías de salida de agua	96
Fotografía 4. Tuberías de alimentación a la poza de disipación.....	96
Fotografía 5. Vista del Canal hidrodinámico hasta la piscina de almacenamiento	97
Fotografía 6. Soporte de Canal hidrodinámico “Caballetes”	97
Fotografía 7. Canal Hidrodinámico aguas debajo del vertedero	98
Fotografía 8. Motobomba de 7 HP y 15 HP	99
Fotografía 9. Tuberías y mangueras de alimentación.....	99
Fotografía 10. Piscina de almacenamiento y punto de alimentación	100
Fotografía 11. Datalogger.....	101
Fotografía 12. Sensores de presión.....	101
Fotografía 13. Modelos finalizados listos para la prueba hidráulica.....	102
Fotografía 14. Corte de planchas metálicas a medida para vertederos.....	102
Fotografía 15. Pulido de planchas metálicas	102
Fotografía 16. Trazo y soldadura de plancha metálica para vertederos	103
Fotografía 17. Soldadura de paredes del vertedero	103
Fotografía 18. Pulido de perfil de cresta.....	103
Fotografía 19. Pintado de vertedero	104
Fotografía 20. Acabado final de vertedero a ensayar	104
Fotografía 21. Limpieza y habilitación el tercer módulo del canal	104
Fotografía 22. Perforaciones en vertederos para mangueras de presión	105
Fotografía 23. Habilitación de vertedero en canal hidrodinámico	105
Fotografía 24. Wincha, corrector y esponja cuadrada cinta teflón, cinta de embalaje y cinta masking tape	105
Fotografía 25. Silicona transparente Sikasil AI y su aplicador	106
Fotografía 26. Cúter, Combo, punzón de granito, cincel de metal.....	106
Fotografía 27. Pipeta de agua	106
Fotografía 28. Taladro	107

Fotografía 29. Caudalímetro Son Tek IQ, Display de datos, y alimentador de energía.....	107
Fotografía 30. Vertedero en laberinto de 01 ciclo, 10°, P= 0.185m. en funcionamiento Q= 41 L/s	110
Fotografía 31. Vertedero en laberinto de 02 ciclos, 10°, P= 0.11m. en funcionamiento Q= 16 L/s	111
Fotografía 32. Vertedero en laberinto de 03 ciclos, 10°, P= 0.075m. en funcionamiento Q= 14 L/s	113
Fotografía 33. Vista frontal y lateral de vertedero en laberinto de 01 ciclo, 15°, P= 0.185m en funcionamiento. Q= 14 L /s.....	115
Fotografía 34. Vista frontal y lateral (condición de “cavidad” de napa vertiente sobre la cresta del vertedero) del vertedero en laberinto de 02 ciclos, 15° P= 0.11m. en funcionamiento Q= 15 L/s	116
Fotografía 35. Vertedero en laberinto de 03 ciclos, 15°, P= 0.075m. en funcionamiento. Q= 12 L/s	118
Fotografía 36. Vertedero en laberinto de 01 ciclo, 20°, P= 0.185m. en funcionamiento; muestra de salto hidráulico aguas abajo Q= 17 L/s	119
Fotografía 37. Vertedero en laberinto de 02 ciclos 20°, P= 0.11m. en funcionamiento Q= 15 L/s	121
Fotografía 38. Vertedero en laberinto de 03 ciclos 20°, P= 0.075m. en funcionamiento Q= 14 L/s	123
Fotografía 39. Longitud de interferencia (Vertedero de 02 ciclos, Q= 15 l/s)	183
Fotografía 40. Intersección de láminas vertientes (Vertedero de 02 Ciclos, Q= 30L/s.) ...	183
Fotografía 41 Sumersión Local (Vertedero 02 Ciclos Q=40L/s)	184
Fotografía 42 Sumersión total (Vertedero 02 Ciclos Q=48L/s)	184



CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Problemática de la Investigación

1.1. Identificación

La presente investigación analizó el comportamiento de tres aliviaderos en laberinto (zigzag), para lo cual se emplearon modelos a escalas definidas a partir del requerimiento y dimensiones del canal.

Los aliviaderos en laberinto son utilizados para optimizar la capacidad de descarga, al aumentar la longitud de la cresta del aliviadero.

El comportamiento de vertedero en laberinto muestra características diferentes a un vertedero recto; en este último, las líneas de corriente son perpendiculares a la cresta y son bidimensionales. En los vertederos en laberinto las líneas de corriente se comportan de manera tridimensional.

Adicionalmente una serie de estructuras en laberinto pueden ser utilizadas para disipar energía en un canal.

1.2. Descripción

La capacidad de descarga de los aliviaderos en presas, muchas veces, se ve limitada por diversos factores, tales como el ancho disponible para la coronación (ancho del cauce) y la altura disponible de la presa (profundidad de la ladera). Así mismo, se deben tener en consideración, factores como la erosión causada por el flujo en la presa y la capacidad de disipación de energía.

Frente a estas limitaciones se busca optimizar la capacidad de descarga, así surge el aliviadero en laberinto, que por su estructura permite evacuar caudales mayores a los aliviaderos convencionales. Así mismo, disipa energía del flujo debido al choque de las láminas de agua que pasan por su superficie. Algunos investigadores como Henry Favley, Silva Fernandez, Willi Hager, Blake Tullis, Michael Pfister Mamok Suprpto, Toledo Municio, entre otros, han realizado estudios acerca del comportamiento de este tipo de aliviadero mediante modelos experimentales y deducciones teóricas. Esto, debido a que, como en la mayoría de estructuras hidráulicas, el comportamiento es complejo de caracterizar mediante modelos analíticos y/o matemáticos.

La principal ventaja de este tipo de aliviadero es la mayor capacidad de descarga, sin embargo, por su geometría, el ángulo de abertura de las crestas permite una amplia selección de diseños que no necesariamente son lo más adecuados.

Aún con las investigaciones realizadas surgen interrogantes acerca del comportamiento hidráulico de los aliviaderos en laberinto. Es así que planteamos la necesidad de hacer un modelo experimental para observar y definir el los patrones de comportamiento del flujo sobre la estructura, en la ciudad de Arequipa.

2. Diseño Teórico

2.1. Justificación

La disponibilidad del agua en las diversas culturas ha sido un factor limitante para su desarrollo, principalmente la necesidad de abastecimiento y el control de inundaciones. Fueron, éstos, los factores que llevaron al hombre a construir embalses. Los aliviaderos, como elementos de una presa (embalse), garantizan la seguridad del sistema hidráulico. En la naturaleza, se presentan fenómenos de origen pluvial que ocasionan grandes avenidas, por lo que, se debe tener una estructura capaz de evacuar grandes caudales.

Estas grandes avenidas existen debido a la incertidumbre en el cambio de estaciones, alta intensidad de lluvias, inundaciones y sequías en muchas áreas que anteriormente nunca antes habían experimentado tales desastres. El impacto de estos fenómenos en las presas es la rápida elevación del nivel de agua. Estas situaciones ponen en peligro la integridad del embalse.

Muchas veces, la construcción de la estructura del aliviadero carece de espacio suficiente para un diseño óptimo, lo que constituye una limitación para la descarga del caudal de agua excedente. En ese sentido se debe optimizar la capacidad de evacuación del aliviadero.

2.2. Problema

Los aliviaderos en laberinto se pueden utilizar para optimizar la descarga de agua al aumentar la longitud de la cresta del aliviadero, sin embargo, no se cuenta con un modelo analítico confiable para describir su comportamiento.

La presente investigación analizó el comportamiento de tres tipos de aliviaderos en laberinto con diferente ángulo de abertura con respecto a la pared del canal hidrodinámico. Para ello, se emplearon modelos diseñados de acuerdo a las especificaciones obtenidas en la literatura investigada.

El comportamiento de vertedero en laberinto muestra características diferentes a un vertedero recto. En estos últimos las líneas de corriente son perpendiculares a la cresta y son bidimensionales. En los vertederos en laberinto las líneas de corriente se comportan de manera tridimensional.

Adicionalmente una serie de estructuras en laberinto pueden ser utilizadas para disipar energía en un canal.

3. Objeto

Analizar el comportamiento hidráulico de aliviaderos en laberinto en la ciudad de Arequipa

3.1. Campo de estudio

Comportamiento hidráulico de aliviaderos en laberinto mediante un modelo hidrodinámico ensayado una altura superior a 2300 msnm

3.1.1. Objetivo

3.1.1.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento hidráulico de un aliviadero en forma de laberinto mediante un modelo hidrodinámico.

3.1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento hidráulico de los aliviaderos en forma de laberinto con diferentes ángulos de abertura, sobre un modelo de canal hidrodinámico.
- Determinar el caudal máximo para el comportamiento propio de la estructura.

- Determinar el ángulo de abertura máximo y mínimo más eficiente en la tarea de la estructura.
- Verificar el comportamiento hidráulico de un vertedero en forma de laberinto, observando el cambio del tipo de flujo
- Verificar la disipación de energía que se produce aguas abajo de la estructura.
- Elaborar un texto de consulta para estudiantes y profesionales, de donde se pueda extraer datos confiables del comportamiento hidráulico de aliviaderos en laberinto.

TIPO	VARIABLES	CONCEPTUALIZACION	OPERACIONALIZACION
INDEPENDIENTE	Carga de Operación	Carga total que opera sobre la cresta del vertedero	Medición del tirante sobre la cresta del vertedero
	Altura de Paramento	Geometría del modelo, estructura del vertedero	Configuración de las paredes del vertedero
	Angulo de abertura de las paredes del paramento	Geometría del modelo, estructura del vertedero	Configuración de la abertura de las paredes del vertedero
	Número de ciclos	Geometría del modelo, estructura del vertedero	Cantidad de vértices que llevará el vertedero
DEPENDIENTE	Caudal	Cantidad de flujo vertido en un periodo de tiempo a través del vertedero	Selección de diferentes valores en caudales específicos para el experimento
	Presiones Superficiales	Presiones generadas producto del flujo a través de la superficie y cresta del vertedero	Selección de puntos específicos sobre la superficie del vertedero
	Velocidades	Velocidad del flujo en el canal de aproximación, sobre la superficie del vertedero y aguas abajo del mismo, correspondientes a los caudales y alturas de carga	Selección de puntos específicos aguas arriba, sobre el vertedero y aguas abajo del mismo

Cavitación	Generación de burbujas de vapor de agua por cambio de fase debido a cambios bruscos de presión y velocidad.	Calculo Manual del Índice de Cavitación
------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------

4. Hipótesis

Dado que se estudiaron las propiedades del aliviadero en laberinto, era posible que estas se vean influenciadas de manera directa o inversamente proporcional por las características de su diseño geométrico. La altura del paramento influye en la capacidad de descarga del aliviadero, siendo que, a mayor altura mayor capacidad de descarga. El ángulo de abertura entre las láminas del paramento influye en el cambio del tipo de flujo aguas abajo del aliviadero.

5. Estructura y contenido general

Capítulo 1, se hace la presentación e introducción del tema de vertederos, además de los objetivos generales y específicos.

Capítulo 2, Se realiza la recopilación de información relevante para el desarrollo del tema como teoría de vertederos en general, corrientes de flujo y fórmulas utilizadas para hallar coeficientes de descarga de vertederos.

Capítulo 3, Se hace la descripción de los vertederos en laberinto propiamente dichos, haciendo hincapié a su comportamiento hidráulico, diseño y geometría.

Capítulo 4, Se establecen las conclusiones y recomendaciones que el presente estudio ha obtenido.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEORICO

1. Antecedentes

Los aliviaderos de cresta libres son hidráulicamente eficientes y seguros en su funcionamiento. Dado que su capacidad de descarga es directamente proporcional a la longitud de la cresta, se han desarrollado varios tipos con el fin de aumentar la longitud de esta última. Entre estos tipos, los aliviaderos de vertedero laberínticos tradicionales se han estudiado y utilizado durante mucho tiempo. Su rendimiento hidráulico y el efecto de los parámetros geométricos implicados son bien conocidos. Sin embargo, su diseño todavía tiene que basarse en curvas de rendimiento generalizadas y derivadas experimentalmente.

A pesar de que existe una gran cantidad de información publicada sobre métodos de diseño hidráulico de vertederos en laberinto, puede existir dificultad para alcanzar un diseño óptimo para una ubicación específica, puesto que; las limitaciones de información y las restricciones existentes pueden influir en el diseño de las obras complementarias del aliviadero. Erwin Horacio Barahona Ochoa 17

Además, Falvey (2003) cita el uso de vertederos laberínticos como disipadores de energía, aplicados para controlar la calidad del agua ventilando o des aireando el flujo. Lux & Hinchliff (1985) y Pinto Magalhães (1985) ofrecen una descripción general de las características de las instalaciones laberínticas existentes.

La característica distintiva de los aliviaderos laberínticos es que la forma en planta no es lineal, sino que varía utilizando una forma en planta repetida como:

- Forma de U (eventualmente rectangular),
- V o forma triangular y
- forma trapezoidal.

Dependiendo de la aplicación, la cresta del vertedero puede tener diferentes formas como (Falvey, 2003)

- cresta afilada o estrecha,
- cresta plana,

- cresta de cuarto de vuelta,
- cresta semicircular y
- cresta conopial.

El propósito del presente trabajo es el de ahondar en el análisis de los resultados y obtener más información de los modelos propuestos para el estudio y generar nueva información acerca del comportamiento hidráulico de este tipo de vertederos.

2. Marco Teórico

2.1. Conceptos.

En el presente trabajo se analizaron los conceptos básicos y complejos acerca de aliviaderos para el desarrollar la metodología apropiada para el análisis de los mismos. Se consideraron: Presas, aliviaderos, embalse de agua, paramento, resalto hidráulico, flujos uniformes, entre otros.

2.2. Presa

Estructura que se emplaza en una corriente de agua para embalsar o desviarla para su posterior aprovechamiento o para proteger una zona de sus efectos dañinos.

2.2.1. Clasificación de presas

La clasificación puede ser variada. Por ejemplo, según la United States Bureau Reclamation (USBR) esta clasificación depende del uso de la presa, del diseño hidráulico y por los materiales de construcción utilizados en su construcción.

Por su utilización pueden ser clasificadas en presas de embalse, derivación, o de retención. Las presas de embalse se utilizan para almacenar agua en periodos de abundancia y utilizarla cuando el suministro de agua sea insuficiente o deficiente. Estos periodos pueden ser estacionales anuales o hiperanuales. A la vez, esta presa de embalse se clasifica según el uso del agua almacenada; ya que, puede utilizarse para embalsamiento, recreo, pesca, preservación de fauna, producción de energía hidroeléctrica, regadío, etc.

Las presas de derivación se construyen para conseguir una altura de carga y transportar el agua mediante el uso de canales o acequias hasta su lugar de utilización. Este tipo de presas es propio de sistemas de riego por gravedad, trasvases de agua, usos industriales o municipales, etc.

Las presas de retención se utilizan regular las crecidas de las avenidas y disminuir sus efectos. De este mismo existen dos tipos: el primero embalsa temporalmente el agua y desembalsa a través de un desagüe cuya capacidad no debe exceder al caudal del canal aguas abajo. El segundo embalsa agua durante un largo periodo drenando el agua mediante capas de grava, a veces denominada presas de riego por inmersión.

Por sus características hidráulicas se clasifican en presas de vertederos o no vertederos. Las presas de vertederos pueden verter por la coronación. La coronación debe ser construida con materiales que el agua no erosione, por ejemplo, el concreto. Por otro lado, las presas no vertedero, no vierten el agua por su coronación, este tipo de presas permite el empleo en su construcción de tierra y escollera.

Por los materiales empleados es por ejemplo donde se permite su diferenciación estructural, es así que podemos mencionar a las presas de gravedad de hormigón o de arco de hormigón. Sin embargo, en esta guía vamos a tratar los tipos de presas más comunes realizadas a la actualidad que son las presas de tierra, escollera y de gravedad de hormigón

Las Presas de tierra son unas de las más comunes debido a que sus materiales se encuentran en estado natural con un proceso mínimo, en este tipo de presas es común que tenga fallas producto de grandes avenidas.

Las presas de escollera son construidas, principalmente, de rocas de todos los tamaños para darle estabilidad y de una capa de tierra impermeable para darle estanqueidad. Estas presas pueden ser dañadas completamente producto del desbordamiento de coronación motivo por el cual debe de construirse un aliviadero de capacidad suficiente para prevenir estas fallas.

Las presas de gravedad de hormigón son una buena alternativa en puntos donde exista un suelo rocoso bueno, estas pueden tener aliviaderos de coronación

Las presas de arco de hormigón son ideales en lugares donde la relación entre el ancho del estribo y la altura no sea grande y además puedan los estribos soportar el empuje de los arcos

Las presas de contrafuertes de hormigón utilizan un 60% menos de hormigón que las presas de gravedad, sin embargo, ya que este tipo de presas es generalmente de pantalla, es que se utiliza más material de encofrado, así que el costo que produce el mismo encofrado y el acero, suele superar el ahorro realizado en el hormigón.

2.2.1.1. Partes de una presa

Una presa consta principalmente del embalse, los estribos laterales y la cimentación.

- Embalse.
- Caseta de control.
- Aliviaderos o vertederos de excedencias.
- Obras de Toma.
- Ductos de descarga.
- Instalaciones generales.

2.2.2. Aliviaderos.

El aliviadero es una parte importante de la presa. Este, permite la liberación del excedente de agua producto de avenidas periódicas y excepcionales o una combinación de ambas. La elección del tipo de aliviadero vendrá acompañado por la magnitud de las avenidas que deben pasar, así es que en causas de grandes avenidas potenciales, el aliviadero será la estructura principal y la elección del tipo de presa puede ser de orden secundario.

Para el diseño de un vertedero es necesario tomar en cuenta algunos parámetros esenciales para determinar su capacidad como son: la altura relativa a la profundidad de aguas arriba, la forma de la cresta, y la longitud de la cresta. De los parámetros ya mencionados, la longitud de la cresta es la que tiene mayor influencia en la capacidad del vertedero.

2.2.2.1. Partes de un Aliviadero.

2.2.2.1.1. Estructuras de control:

Estos elementos forman la parte principal del aliviadero, ya que gracias a los mismos se puede prevenir la salida de caudal de agua por debajo de los niveles de diseño del embalse y controlar el caudal de desagüe cuando los límites son excedidos por algún evento extraordinario. Estas estructuras pueden estar constituidas por un orificio, un vertedero de pared delgada o gruesa, o una tubería.

Estas estructuras de control pueden presentar diferente ubicación y formas. El vertedero puede ser de pared delgada o gruesa, de sección transversal en forma parabólica, angular, etc.

Asimismo, pueden trabajar libremente, parcial o totalmente sumergidos.

2.2.2.1.1.1. Canal de desagüe:

El caudal desaguado por la estructura de control es conducido nuevamente hacia el cauce del río mediante un canal de desagüe. Generalmente este sigue una pendiente de 2‰ y así desarrollar una longitud necesaria de acuerdo al perfil del terreno para llegar al río, no obstante, se dan algunas situaciones en donde este canal tenga que pasar por debajo de carreteras o líneas de ferrocarril. En estos casos se pueden realizar obras de arte como sifones. De igual forma estos canales pueden o no llevar un revestimiento desentendido de la erosión del material disponible para su construcción.

2.2.2.1.2. Estructuras terminales:

La diferencia de alturas entre dos puntos de recorrido de agua, produce energía potencia y energía cinética al pie de aliviadero. Esto se manifiesta en forma de elevadas velocidades que podrían llegar a dañar la estructura aguas abajo del aliviadero, motivo por el cual es necesario contar con estructuras que puedan disipar la energía y salvaguardar las estructuras contiguas.

2.2.2.1.3. Canales de toma y desagüe:

Los canales de ingreso o entrada son estructuras que recogen el agua del embalse y la conducen directamente al aliviadero para que este lo descargue y sea conducido nuevamente al cauce natural del río. En ocasiones el aliviadero toma directamente el agua del embalse y la conduce

directamente al río, es aquí que no se precisa de estos canales. Su diseño estará sujeto a disminuir pérdidas de carga en el canal mediante curvas suavizadas y pocas transiciones y así obtener un caudal uniforme del vertedero.

Los canales de salida son aquellos que conducen el agua desde la estructura terminal hacia el cauce del río, su diseño y la necesidad de proteger este canal de desagüe va a depender de la velocidad y erosión que vayan a causar aguas abajo del cauce del río.

2.3. Flujo

Podemos conceptualizar el flujo como aquel fluido que se encuentra en movimiento asimismo que depende de algunas variables como la gravedad, la densidad y la velocidad.

Este mismo puede clasificarse a través de diferente criterio siendo estos:

- Flujo permanente y no permanente
- Flujo uniforme y variado
- Flujo tridimensional
- Flujo Bidimensional
- Flujo Unidimensional
- Flujo Laminar o turbulento
- Flujo compresible o incompresible
- Flujo rotacional o irrotacional, etc.

2.3.1. Clasificación de Flujos

2.3.1.1. Flujo permanente y no permanente.

Para que un flujo se denomine permanente, se debe de tener como criterio o suponer que sus características hidráulicas no varíen con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \text{ etc.}$$

Y por el contrario Para que un flujo se denomine no permanente, sus características hidráulicas varían con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial A}{\partial t} \neq 0; \text{ etc.}$$

2.3.1.2. Flujo uniforme y variado.

El flujo se denomina uniforme si la profundidad del flujo es la misma en cada sección a lo largo de un tramo, manteniendo sus características hidráulicas constantes

$$\frac{\partial y}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial L} = 0; \text{ etc.}$$

El flujo se denomina variado si la profundidad del flujo cambia a lo largo de un tramo ya sea de canal o tubería variando sus características hidráulicas, este tipo de flujo además puede clasificarse como flujo rápidamente variado y flujo gradualmente variado es la misma en cada sección a lo largo de un tramo,

$$\frac{\partial y}{\partial L} \neq 0 \quad \frac{\partial v}{\partial L} \neq 0 \quad \frac{\partial A}{\partial L} \neq 0; \text{ etc.}$$

2.3.1.2.1. Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional

Esta clasificación depende del número de coordenadas espaciales requeridas para describir el campo de velocidad.

Bajo la consideración de promediar lo valores de las características del fluido de una sección, se puede considerar un flujo unidimensional. Esa hipótesis es muy importante en hidráulica para poder realizar diseños de obras hidráulicas de canales, tuberías, etc.

Para el caso de los flujos bidimensionales y tridimensionales se frecuenta más utilizar las coordenadas de velocidad respecto al espacio (x, y, z) y al tiempo, para así poder conocer la distribución de sus velocidades en otras obras de hidráulica.

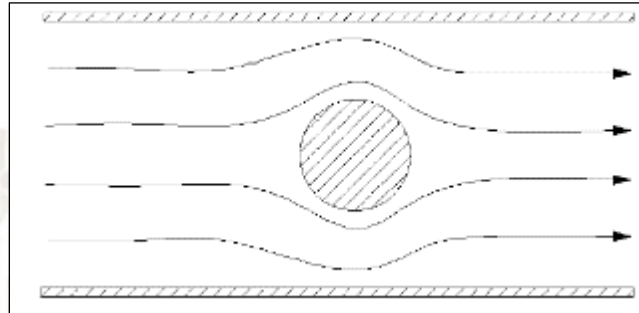


Figura 1 Flujo bidimensional

Fuete: HIDROMECHANICA, E. Becerril (1960)

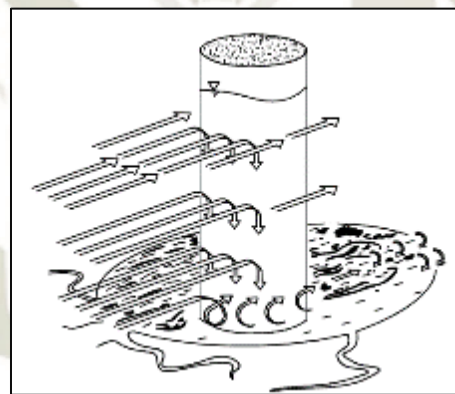


Figura 2 Ejemplo de Flujo bidimensional

Fuete: Introducción a la Hidráulica Fluvial (1998)

2.3.1.2.2. Flujo Laminar o turbulento

Se puede clasificar el flujo laminar y turbulento considerando que ambos son resultado de la viscosidad y fuerzas de inercia del fluido. En el flujo laminar el movimiento de las partículas posee una trayectoria perfectamente separada, sin embargo, no son necesariamente paralelas.

En el flujo turbulento el movimiento de sus partículas describe una trayectoria errática, sin un orden establecido

Para poder clasificar el tipo de flujo ya sea laminar o turbulento, podemos utilizar el número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{VR}{\nu}$$

Siendo:

- Re = Número de Reynolds
- V = Velocidad media (m/s)
- R = Radio hidráulico de la sección transversal (m)
- ν = Viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

De acuerdo a los resultados obtenidos de hallar el número de Reynolds (Re) en canales abiertos podemos entender los siguientes parámetros.

- Cuando $Re < 500$ quiere decir que las fuerzas viscosas poseen un efecto dominante en cuanto a la pérdida de energía, el flujo se encuentra en régimen laminar.
- Cuando $Re > 2000$ quiere decir que las fuerzas viscosas influyen poco en cuanto a la pérdida de energía, así que el flujo se encuentra en régimen turbulento.
- Cuando $500 \leq Re \leq 2000$ quiere decir que el flujo se encuentra en régimen de transición.

2.3.1.2.3. Flujo subcrítico, crítico y supercrítico

Para poder caracterizar el tipo de flujo relacionando las fuerzas inerciales con las fuerzas de la gravedad es necesario conocer el número de Froude. Este número es un elemento clave para entender los distintos regímenes de flujo que pueden ocurrir en un canal, el número de Froude pues

relaciona los valores que hay entre la velocidad del flujo y los efectos gravitatorios que ocurren en la superficie, mismos que están relacionados con la profundidad del flujo (aquí referida a la profundidad hidráulica). Relaciona por lo tanto efectos de la movilización del flujo (relacionados con la velocidad) y los efectos gravitatorios que ocurren cuando se perturba la superficie del flujo, esas perturbaciones pueden causar alteraciones que se propagan en la superficie.

Esta dada por:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy_m}}$$

Siendo:

- F = número de Froude
- V = velocidad media de la sección (m/s)
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
- y_m = tirante medio o profundidad media (m),

Donde

- y_m a la que se denomina profundidad hidráulica , está dada por:

$$y_m = \frac{A}{T}$$

- T es el ancho de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal y A es el Área del flujo del canal

De acuerdo al número de Froude se tiene:

- Para un valor de $F < 1$, Cuando la velocidad del flujo es pequeña con respecto a la profundidad hidráulica, es decir que las fuerzas de inercia son menores a las fuerzas de gravedad, denominamos a este flujo como flujo subcrítico.
- Para un valor de $F = 1$, Cuando la velocidad del flujo es igual a la profundidad hidráulica, es decir que las fuerzas de inercia son iguales a las fuerzas de gravedad, denominamos a este flujo como flujo crítico.
- Para un valor de $F > 1$, Cuando la velocidad del flujo es mayor con respecto a la profundidad hidráulica, es decir que las fuerzas de inercia son mayores a las fuerzas de gravedad, denominamos a este flujo como flujo súper crítico.

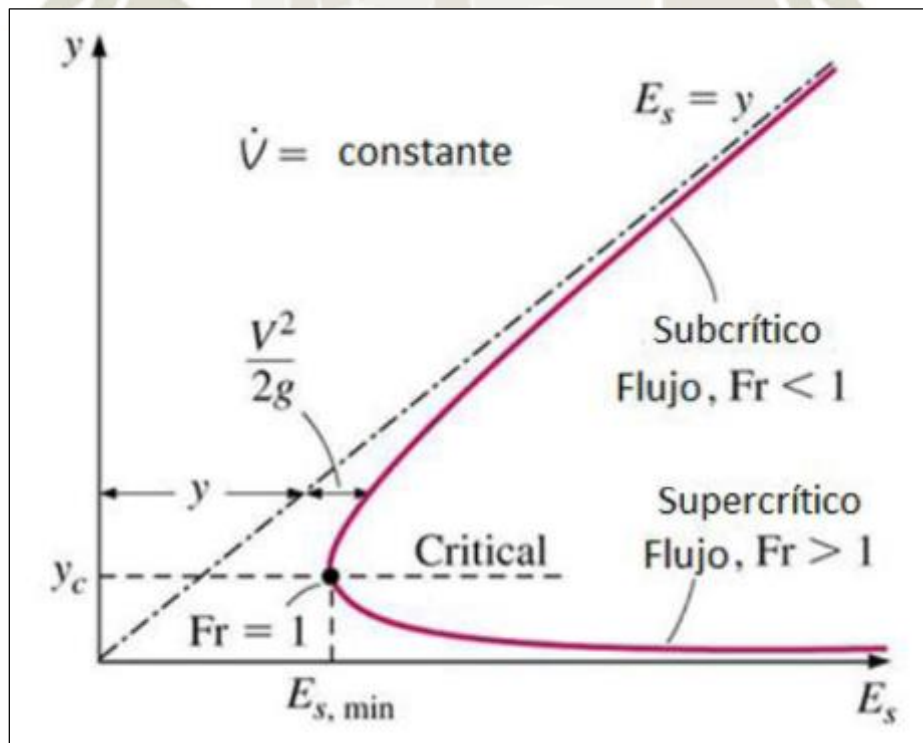


Figura 3 flujo crítico, subcrítico y supercrítico

Fuete: Llanque Quispe (2012)

2.4. Elementos para el diseño de un vertedero

2.4.1. Paramento o altura del vertedero (P)

Se llama paramento a la distancia vertical que contempla la pared del vertedero desde el fondo del canal hasta su parte superior o cresta del vertedero. Ver figura 4

2.4.2. Ancho del vertedero (W)

Nos referimos al ancho del vertedero a la distancia total que ocupa el canal en su sección transversal como se muestra en la figura 4

2.4.3. Longitud del vertedero (L)

Se llama también longitud efectiva de vertedero. Es la longitud total del recorrido del vertedero en la sección transversal del canal. Esta longitud efectiva varía de acuerdo a la forma del vertedero en por su inclinación, forma, ángulo, etc. Sin embargo, en vertederos de cresta recta el ancho de canal y la longitud efectiva es la misma.

Ver figura 4

2.4.4. Altura de carga (h)

Denominamos altura de carga o carga sobre el vertedero a la altura H que va a ocupar el espesor del chorro por encima del vertedero con respecto a un plano horizontal que pasa por la cresta. Este dato es muy importante a considerar en los parámetros de análisis y diseño del vertedero.

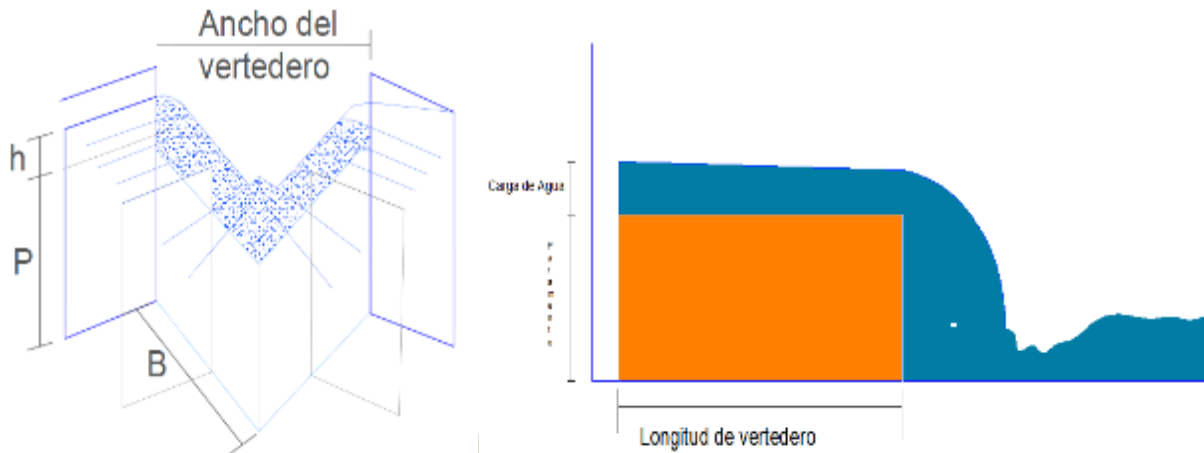


Figura 4 Vertedero en laberinto vista frontal y lateral

Fuete: Elaboración propia

2.5. Clasificación de Vertederos

Para poder clasificar a los vertederos existen parámetros a tomar en cuenta. Por ejemplo, podemos clasificarlos de acuerdo a su descarga, a la forma del vertedero, a la altura del paramento, al ancho de pared del vertedero, a la forma de descarga del vertedero, etc.

2.5.1. Clasificación por la forma del vertedero:

Dependiendo de la forma de los vertederos podemos clasificarlos en:

Vertedero Rectangular. - Dispositivo hidráulico que consta de una placa cortada de forma regular por donde fluye el agua. Es utilizado satisfactoriamente en medición de caudales en canales y cursos de agua natural de pequeña magnitud.

Vertedero Triangular. - Este tipo de vertedero es utilizado con mayor precisión para medir pequeños caudales, esto es debido a que vertedero triangular es más preciso que el rectangular, ya que, para un mismo caudal, los valores de h son mayores.

Vertedero Trapezoidal. - El vertedero trapezoidal tiene la finalidad de disminuir el efecto de las contracciones que tiene el vertedero rectangular contraído. Su geometría ha sido diseñada de forma que las ampliaciones laterales compensen el caudal disminuido por las contracciones de un vertedero rectangular y evitar las correcciones en los cálculos.

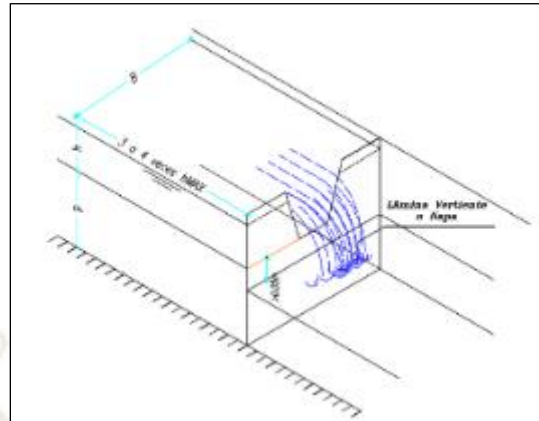


Figura 5 Figura 1 vertedero trapecoidal

Fuente: Almeyda Cruz (2009)

Vertedero de perfil circular. - Su perfil, generalmente, se diseña según la superficie inferior de una vena líquida que se derrama libremente; cuya carga corresponde al caudal de proyecto (Sandoval, 2013). Donde a medida que la lámina pasa por la cresta del vertedero permanece suave y en la cada se adhiere a la cara del mismo (figura 6). Este proceso de adhesión del agua es una forma de efecto Coanda, mencionando que la modificación del campo de presión dentro de lámina de agua, es causada por la curvatura convexa invertida, induciendo presión de succión en la pared. Por lo general, la separación de la lámina se produce en la parte inferior del vertedero (Chanson & Montes, 1998)

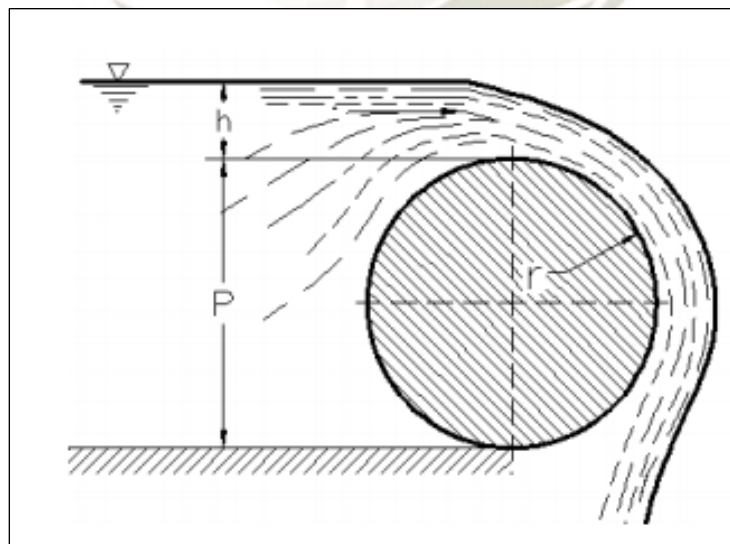


Figura 6 Vertedero de perfil circular

Fuente: Arreaga Carrión (2014)

2.5.1.1. Clasificación por el tipo de Pared:

Generalmente podemos encontrar dos clases de vertederos según el espesor de la pared, estos son los de pared delgada y de pared gruesa.

2.5.1.1.1. Vertederos de pared delgada

Este tipo de vertederos se utiliza no solamente para realizar el control de caudales en canales abiertos, sino también es la forma más simple de vertederos de rebose.

El contacto entre el agua y la cresta es sólo una línea. Para considerar a un vertedero de pared delgada como tal, el espesor de la cresta debe ser menor a $2H/3$

En este tipo de vertederos también podemos apreciar que en la napa que vierte el vertedero la presión en todo su contorno es igual a la presión atmosférica.

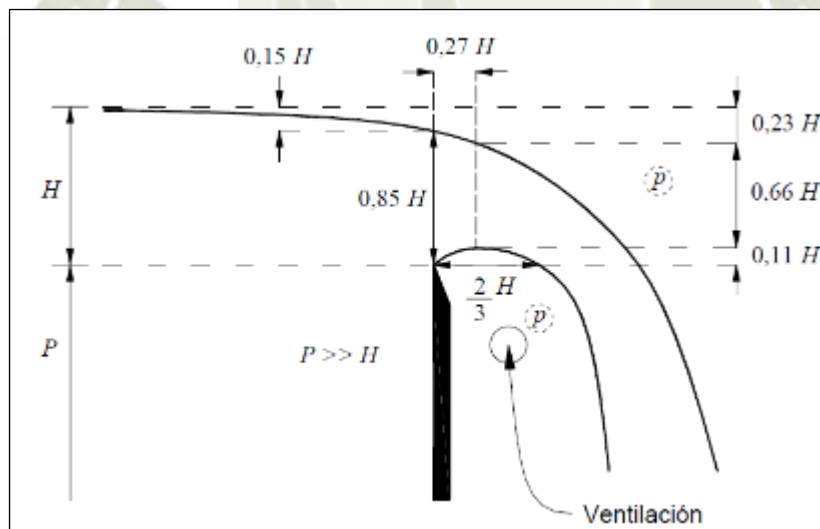


Figura 7 Vertedero de pared delgada

Fuente: Hidráulica de tuberías y Canales, Arturo Rocha, (2007)

2.5.1.1.2. Vertederos de pared gruesa

Los vertederos de pared gruesa suelen utilizarse como estructuras hidráulicas en presas, además, se pueden utilizar para controlar rebose de niveles hidráulicos en eventos que propicien altos niveles de caudal.

El contacto en los vertederos de pared gruesa es un plano. El flujo se adhiere a la cresta. Para considerar a un vertedero de pared delgada como tal, el espesor de la cresta debe ser mayor a $2H/3$

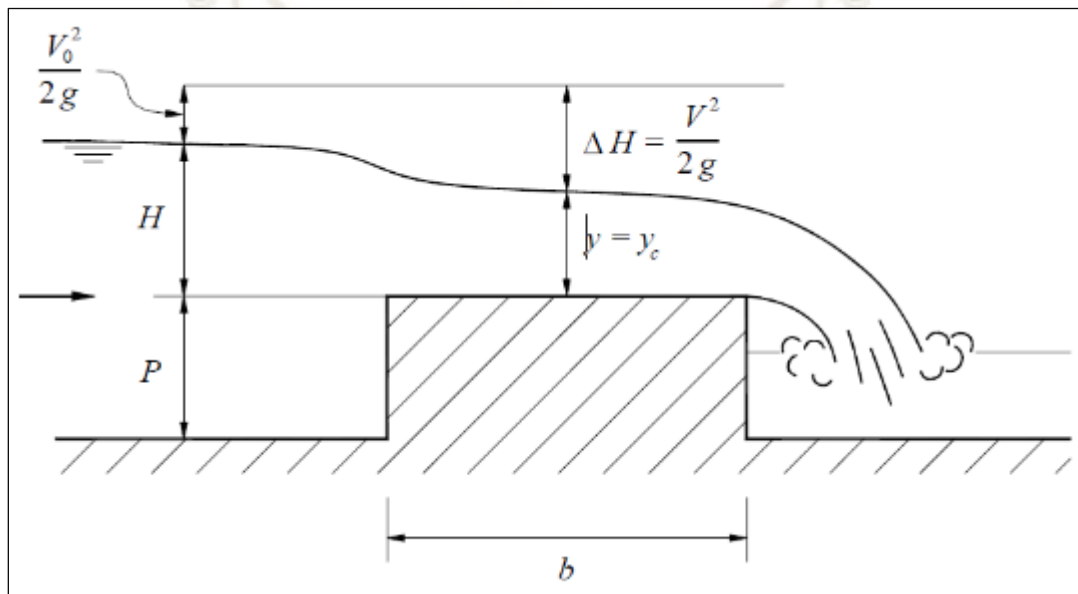


Figura 8 Vertedero de pared gruesa, vista lateral

Fuente: Hidráulica de tuberías y Canales, Arturo Rocha, (2007)

2.5.1.2. Clasificación por el nivel de agua

2.5.1.2.1. Vertedero Libre.

En esta clase de estructuras el nivel aguas abajo del vertedero es menor que el de la cresta

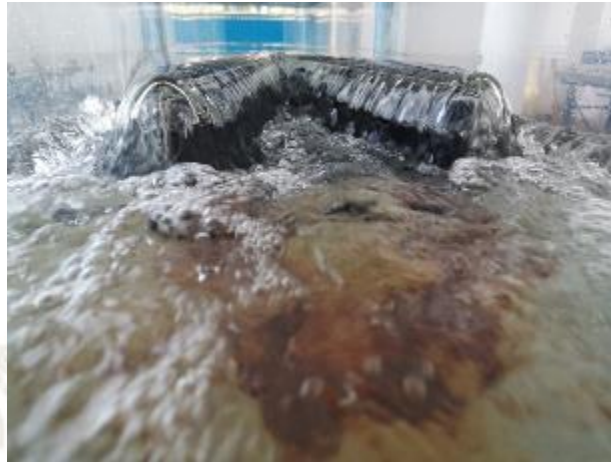


Figura 9 Vertedero en laberinto, aguas abajo

Fuente: Elaboración propia

1.5.1.2.2. Vertedero Sumergido

Esta clase de vertederos se caracteriza porque el nivel de aguas abajo del vertedero es mayor que el de la cresta. Aquí se debe entender que el efecto de sumergencia está sujeta a las condiciones de flujo y no directamente al vertedero.

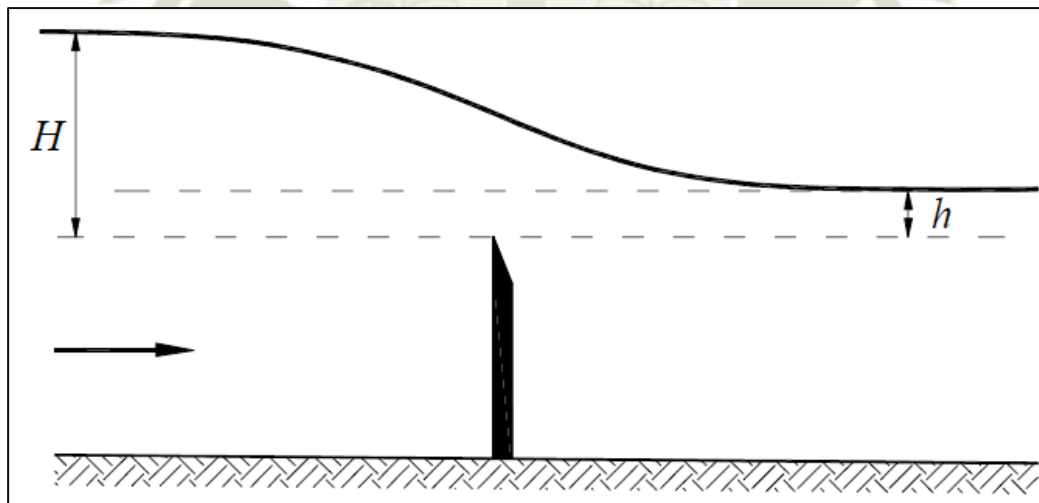


Figura 10 Vertedero sumergido

Fuente: Hidráulica de tuberías y Canales, Arturo Rocha,(2007)

2.6. Tipos de vertederos

2.6.1. Vertederos de Cimacio

Este tipo de vertederos permite una descarga máxima de caudal debido a la forma de su cresta de control de pared gruesa, esta cresta tiene un perfil parecido al de la superficie inferior de una lámina de agua vertida por un vertedero de pared delgada, motivo por el cual es utilizado para aliviar altos caudales en obras hidráulicas de gran envergadura.

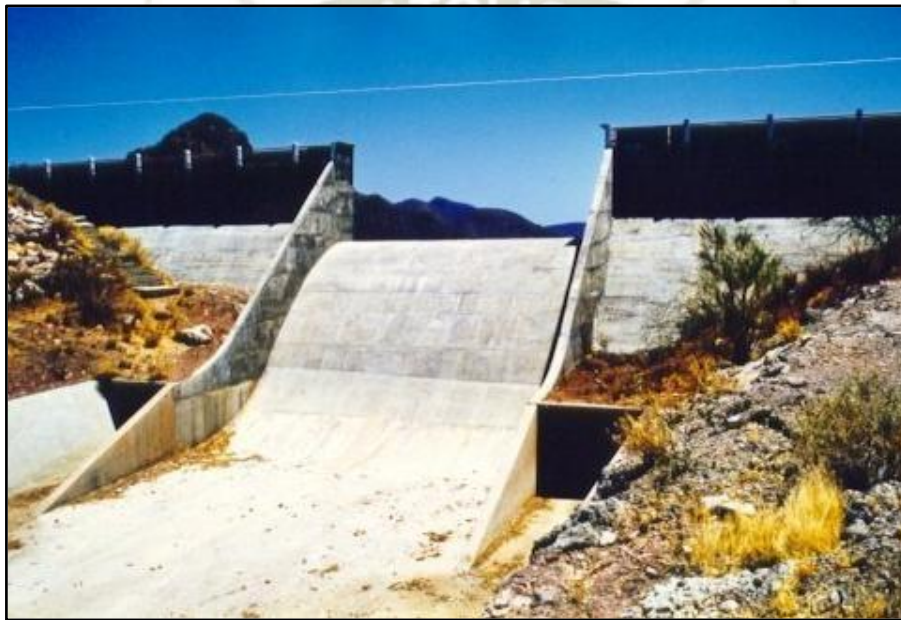


Figura 11 Vertedero Cimacio

Fuente: Llanque, Quispe, (2012)

Los vertederos en Cimacio están constituidos por dos secciones bien marcadas en su diseño, se encuentran aguas arriba y aguas abajo de la cresta, las características de su diseño geométrico van a depender de su longitud efectiva de la cresta, de la carga hidráulica real con la que opere y la inclinación del paramento.

La forma geométrica del vertedero aguas debajo de la cresta también puede obtenerse mediante un método semigráfico el cual consiste en dos curvas tangentes entre sí y tangentes a la cresta del cimacio. Mientras que el perfil aguas abajo de la cresta inicia desde el origen de coordenadas (eje de la cresta) hasta un punto donde se une con el canal de salida con pendiente constante, esta trayectoria está definida por la ecuación: (Victory, 2011).

$$y = -kH_0\left(\frac{x}{H_0}\right)^n$$

Donde:

K y n son coeficientes experimentales que dependen del talud del paramento aguas arriba y de la profundidad del canal

X e Y son coordenadas del perfil de acuerdo con el plano cartesiano

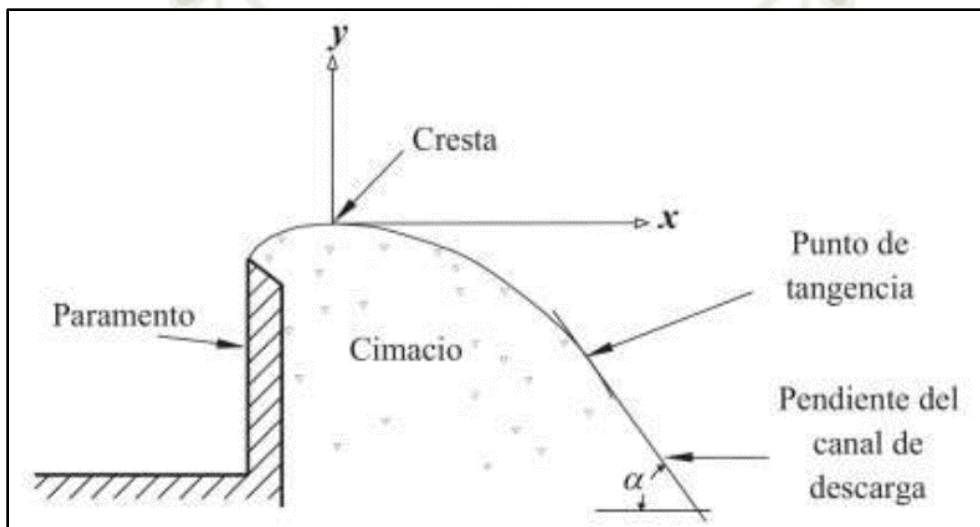


Figura 12 Vertedero de Cimacio

Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. Perfil de un cimacio de cresta libre. (2011)

2.6.2. Vertedero en rápida

Este tipo de vertedero se desarrollan grandes velocidades, es decir, hay rapidez del flujo, y se presenta pues un fenómeno en la parte superior de la estructura, este mismo es el paso del estado sub-crítico, a un estado supercrítico y en la parte inferior vuelve al estado subcrítico, es aquí donde se obtienen un salto hidráulico.

Asimismo, estos vertederos son conocidos como rápidas, canal abierto o vertedero tipo canal y el uso de los vertederos en rápida depende de la sencillez del proyecto ya que generalmente son utilizadas en presas de tierra, motivo por el cual el material para su construcción puede salir de la misma obra además que la adaptación a cualquier tipo de cimentación es más accesible.

Para que este vertedero funcione en óptimas condiciones es que se debe tener en cuenta que al momento de su diseño éste no debe de sufrir variaciones en su ancho de canal ni en su verticalidad, y si es que es muy necesario, este cambio debe ser gradual.

La estructura usual para este tipo de vertederos en su versión más sencilla es la siguiente:

- Canal de entrada
- Estructura de control.
- Canal de descarga
- Estructura terminal
- Canal de desagüe

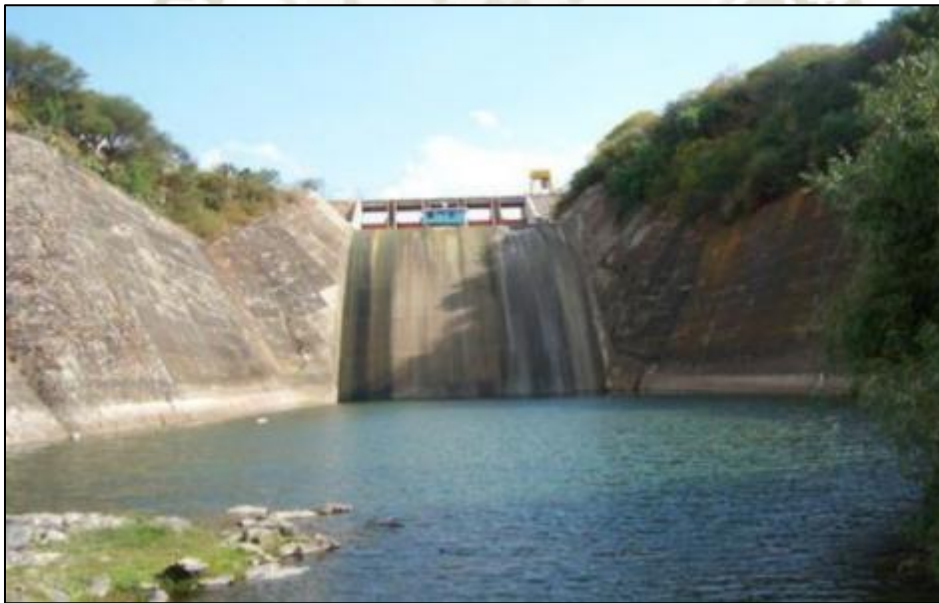


Figura 13 Vertedero en rápida
Fuente: Dr. Mariano R. Martínez Menes, 2010

2.6.3. Vertederos en Sifón

Este tipo de vertederos se presentan en forma de U y tiene la peculiaridad de interconectar dos cámaras, una de entrada que es la que orienta el flujo de la corriente de agua hacia lo que es el sifón y otra de salida, cuya función es guiar el flujo que efluente con dirección al colector de aguas.

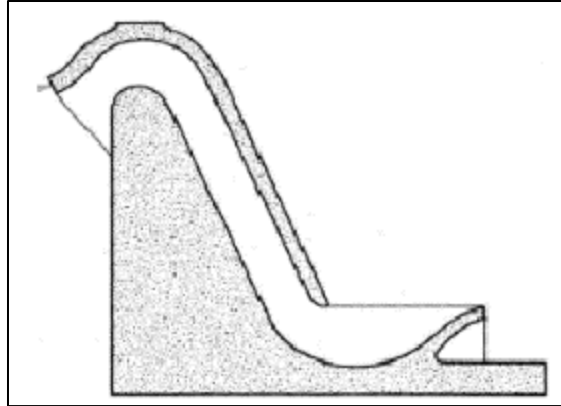


Figura 14 Esquema de vertedero sifón típico

Una característica de este tipo de vertederos es que al ingreso del flujo al sifón se produce por gravedad, en conducto forzado, quedando así el nivel del agua de la cámara de entrada superior al del nivel de la cámara de salida. El nivel de la cámara de entrada es el mismo nivel que el del vaso.

Los componentes que constituyen al vertedor de sifón son los siguientes.

- Cámara superior de entrada
- Rama superior
- Cámara de control
- Rama de salida
- Cámara de salida.
- Canal de salida

Dentro de sus virtudes podemos resaltar su alta capacidad de descarga de acuerdo a la exigencia del proyecto y su operación automática y efectiva,

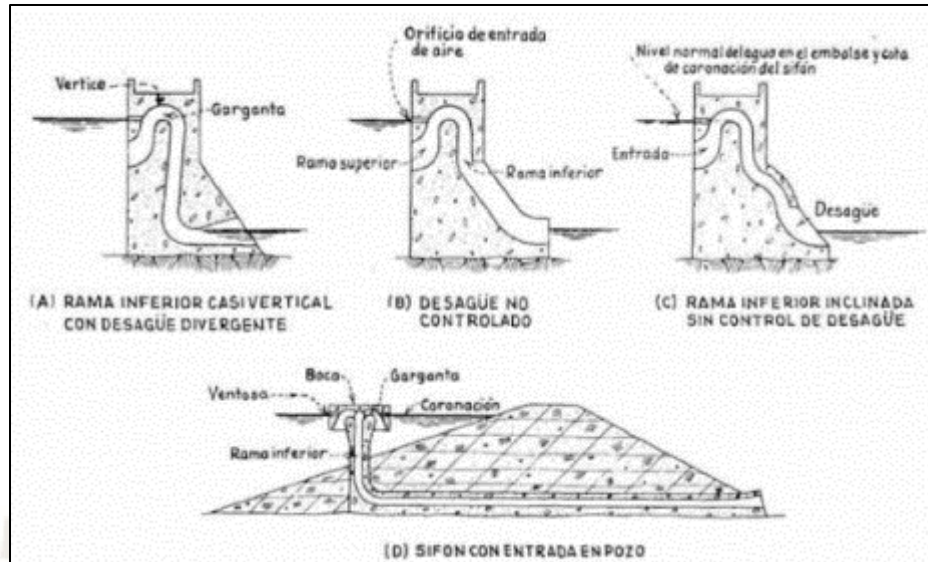


Figura 15 Tipos de vertederos sifón

Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.6.4. Vertederos en caída libre

Este tipo de vertederos se utiliza donde las condiciones estructurales y geométricas de conducción de la vena líquida no son favorables, especialmente en cortinas de arco o contrafuertes. Estos vertederos constan de una pared vertical misma que hace favorable la aparición del desnivel entre aguas arriba y aguas abajo permitiendo así salvar los desniveles del terreno para transportar la vena líquida desde la corona hasta la parte inferior.

En el vertedero de caída libre el flujo golpea la zona del canal aguas abajo, esto se produce libremente siempre y cuando la roca de cimentación es resistente a la erosión, caso contrario se debe prever un colchón amortiguador, el flujo es turbulento en la zona que se encuentra por debajo de la napa aireada y contribuye con la disipación de energía que desarrolla esta estructura.

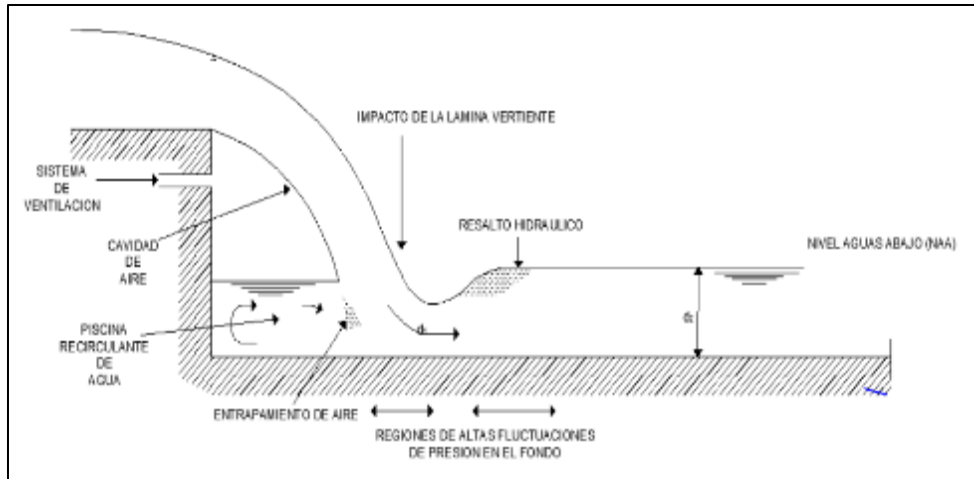


Figura 16 Características del flujo en una estructura de caída

Fuente: Hidráulica de flujo en canales abiertos, 2da Edición .Chanson 2002

2.6.5. Cortinas vertedoras con caída rápida

Podemos encontrar a estos vertedores en secciones reducidas de una cortina de tipo gravedad, donde por encima de esta se permite el flujo de agua.

Las condiciones de diseño de la cresta se harán en condiciones de gasto máximo para que se pueda ajustar a la vena líquida. Se tomarán en cuenta la compactación y calidad de la roca de cimentación de la parte inferior de descarga, esto según a que si presenta buenas características se puede diseñar como un deflector o salto squí, pero si las características son de tenor erosionable se tendrá que realizar un diseño de tanque dissipador de energía.

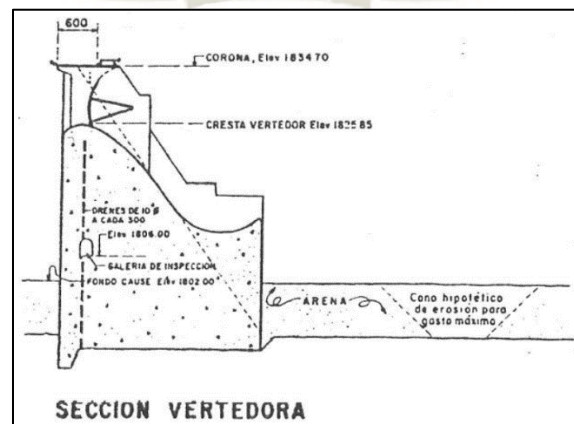


Figura 17 Cortinas vertedoras con caída rápida

Fuente: OBRAS HIDRAULICAS, F. Torres Herrera, 1987

2.6.6. Vertederos con canal lateral

En este tipo de vertederos el aliviadero está situado en posición paralela o casi paralela al eje de la parte superior del canal de desagüe. El agua que vierte sobre la cresta del vertedero cae en un canal estrecho hacia el canal principal de desagüe.

Su diseño se encuentra condicionado al comportamiento hidráulico en el tramo de aguas arriba del canal de desagüe. El agua vertida por este canal lateral puede ir directamente a un canal abierto, tubería o túnel inclinado.

Las características de descarga de este canal son iguales a las de los vertederos típicos y solo dependen del perfil escogido para la cresta.

A pesar de que este tipo de vertederos no sean económicos ni eficientes hidráulicamente hablando, tiene características favorables que los hacen oportunos para algunos tipos de aliviaderos, por ejemplo, cuando se desea colocar un vertedero muy largo para reducir la altura de regulación.

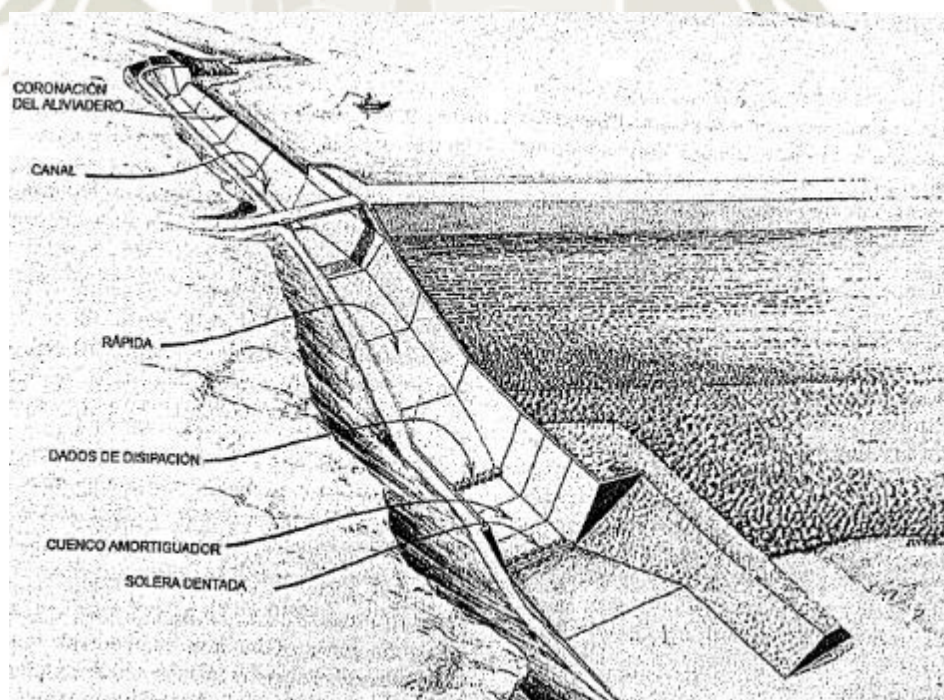


Figura 18 Esquema de vertedero con canal lateral

Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.6.7. Vertederos con tiro vertical

Este tipo de vertedero presenta una entrada en forma de embudo, misma que se conecta a un túnel; en el extremo inferior de este túnel es posible que cuente con la presencia de un deflector o una estructura disipadora de energía.

Los vertederos con tiro vertical se adaptan a presas con gatos relativamente pequeños, a presas con vaso de almacenamiento muy encañonado, donde el agua que fluye debe de moverse a través de los vertederos de forma libre y sin obstrucciones.

2.6.8. Vertederos dentados

Este tipo de aliviaderos es utilizado generalmente por su ahorro económico y las enormes ventajas que ofrece al final de la misma estructura tal como la disminución de la velocidad del fluido, también porque la operatividad del vertedero no se ve afectada aguas abajo. Además, se utiliza para llevar el agua de un nivel superior a un inferior donde no se recomienda un amortiguador. La estructura dentada de este vertedero funciona obstruyendo parcialmente el paso del agua logrando así disipar la energía a medida que baja por el vertedero.



*Figura 19 Vertedero dentado en la presa de Cobconully, Washintong
Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)*

2.6.9. Vertederos en abanicos

Un vertedor en abanico viene a ser una estructura constituida por un cimacio en curva cóncava con relación a la dirección media del escurrimiento y viendo en el sentido del mismo, el cual descarga a un tanque de una geometría tal que propicia un resalto al pie del cimacio y un escurrimiento lento en aquel. El nombre de vertedor en abanico le viene de que el cimacio y el tanque antes mencionado, así como las partes restantes de la estructura, tienen una forma similar al abanico. En el extremo del tanque se tiene una sección de control, después de la cual, a través de una transición en donde se ve acelerando el escurrimiento se llega a un canal de sección constante con régimen rápido. (Márquez José, 2004)

Elementos:

- Canal de Acceso.
- Cimacio.
- Colchón.
- Sección de control.
- Arcos de abanico.
- Transición.
- Conducto de descarga.
- Canal de salida.
- Disipador de energía.

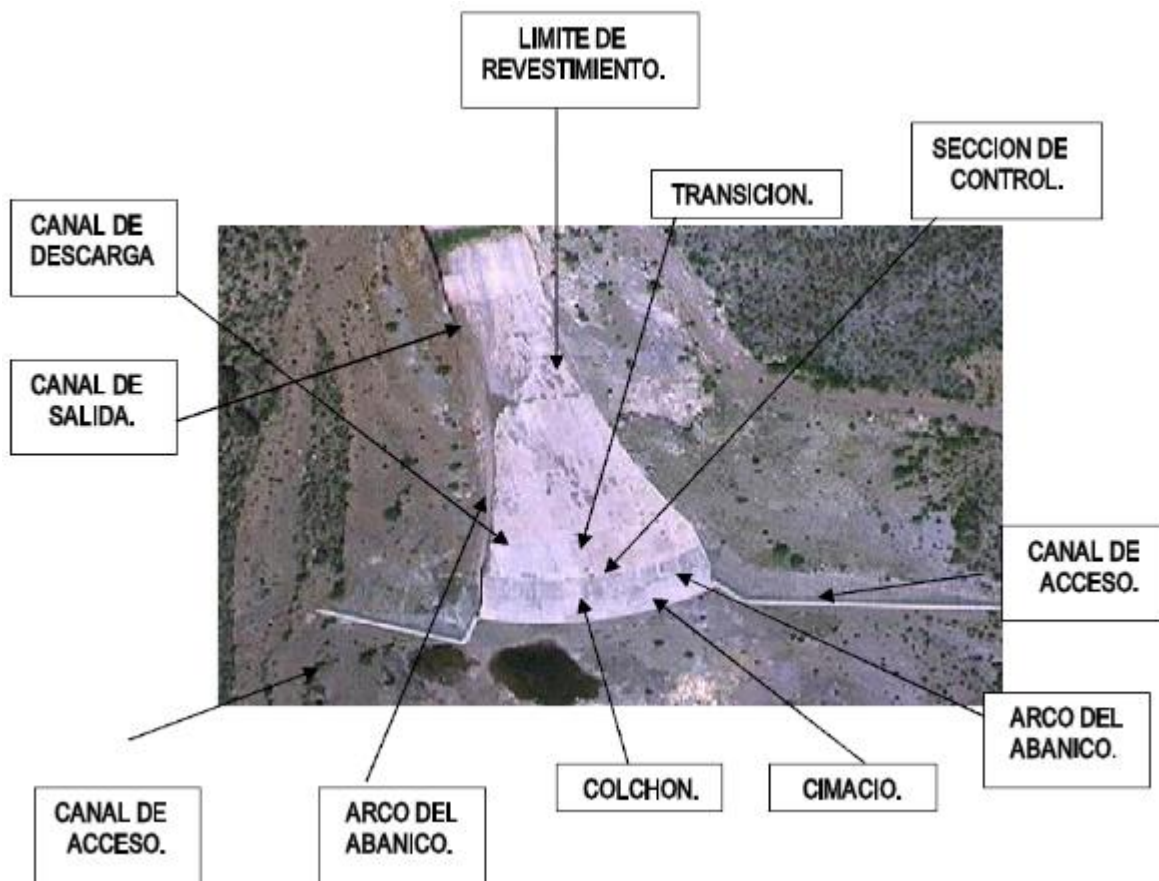


Figura 20 Partes que constituyen un vertedor en abanico.

Fuente: INTRODUCCIÓN DEL DISEÑO DE OBRAS DE EXCEDENCIAS; Sanchez, Bribiesca José Luis

2.6.10. Vertederos de túnel

Este tipo de vertederos se utilizan como solución alterna a los vertederos de tipo canal en ocasiones donde las caídas son grandes en la que el caudal se reparte en un número determinado de túneles que se excavan en las montañas y descargan libremente al río a una altura tal que evite su ahogamiento por remansos ocasionados en el cauce.

Para ello, es importante tener en cuenta las condiciones geológicas y topográficas que aseguren una buena cimentación en la zona de salida del túnel y que además evite las erosiones importantes en sitios de caídas de chorro. Es también conveniente considerar que los túneles empleados en las obras de desvío pueden utilizarse posteriormente como conductos de descarga. (Márquez José, 2004)

Elementos del vertedero de túnel

Los elementos que conforman el vertedero en túnel son los siguientes que se ilustran en la figura 21.

- Estructura de control. (1)
- Túnel de transición. (2)
- Túnel de desvío. (3)
- Sección de control.
- Conducto de descarga. (4)
- Cubeta salto squí. (5)

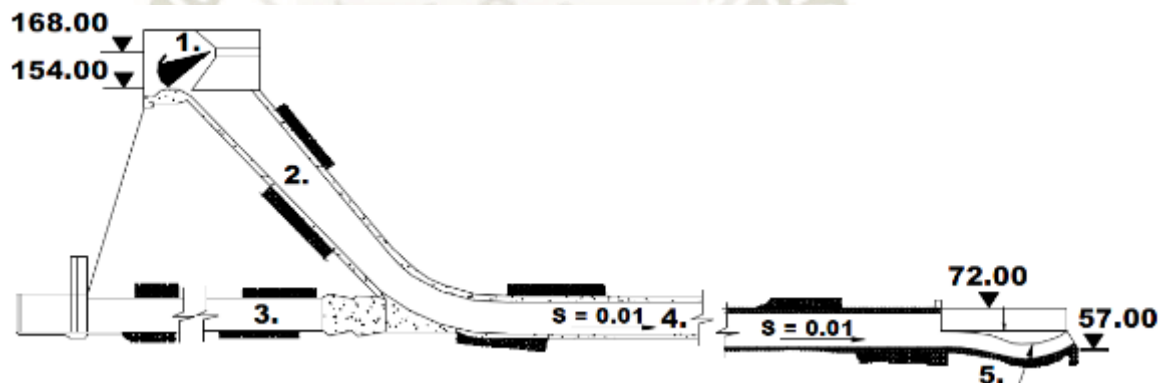


Figura 21 Partes que constituyen un vertedero de túnel

Fuente: INTRODUCCIÓN DEL DISEÑO DE OBRAS DE EXCEDENCIAS; Sanchez, Bribiesca José Luis

2.6.11. Vertederos circulares o morning glory

Estos vertederos también llamados vertederos circulares o aliviaderos en pozo, son aquellos en los que la toma de agua está situada horizontalmente; desde allí el agua cae a un pozo vertical, o casi vertical, hasta alcanzar una conducción horizontal que lleva el cauce del río aguas abajo. Las características de desagüe varían con la importancia de la carga de agua y su control varía con la capacidad de descarga del vertedero.

Podemos distinguir tres partes fundamentales:

- Vertedero de control.
- Transición vertical.
- Conducto cerrado de desagüe.

Estos aliviaderos son recomendables en presas situadas en desfiladeros muy angostos, también se llega a alcanzar la capacidad máxima de desagüe con cargas de agua relativamente bajas, eficaz para limitar el máximo caudal desaguado; sin embargo, es una desventaja al momento de desaguar caudales mayores a las previstas en el diseño. (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966).



Figura 22 Aliviadero tipo Morning Glory de la presa de Monticello

Fuente: Cristina Marin Abreu

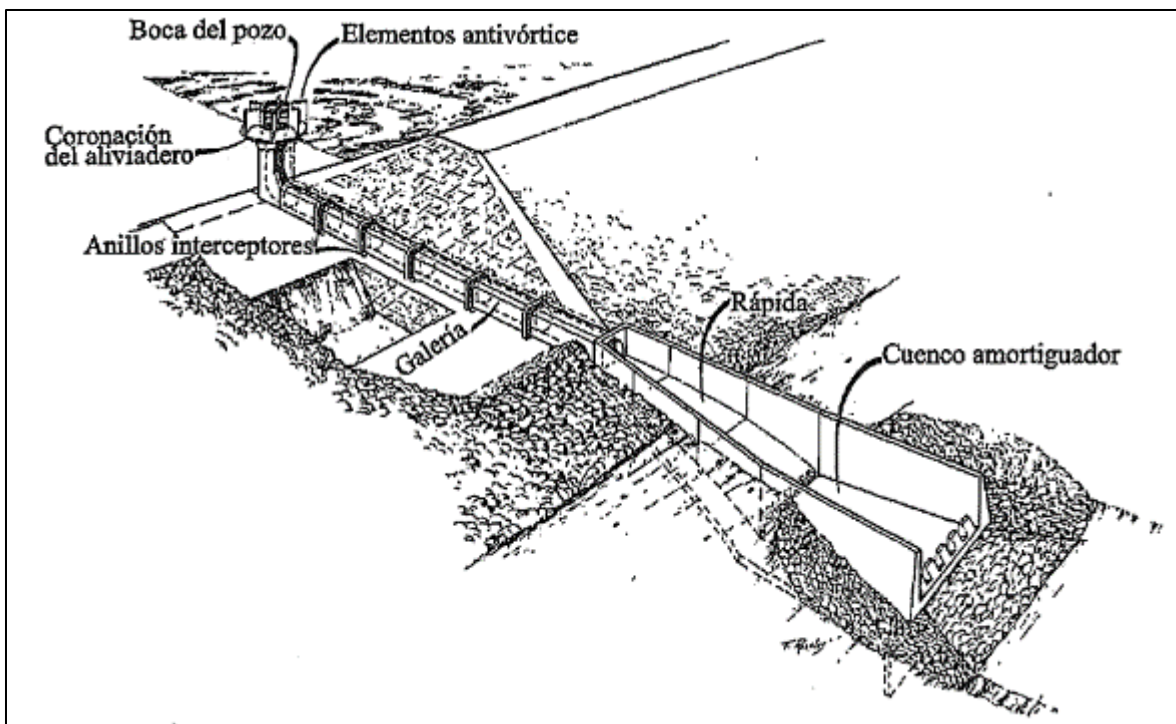


Figura 23 Componentes de vertedero en pozo

Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.6.12. Vertederos con descarga directa al canal

Estos vertederos generalmente se localizan en las laderas u otros lugares apropiados debido a que los asentamientos producidos por su propia construcción podrían ocasionar alguna rajadura o desperfecto de la estructura, esto sería perjudicial al momento en el que el agua vertida alcance grandes velocidades, ocasionando grandes presiones en la fractura, produciendo así una falla o colapso de la estructura.

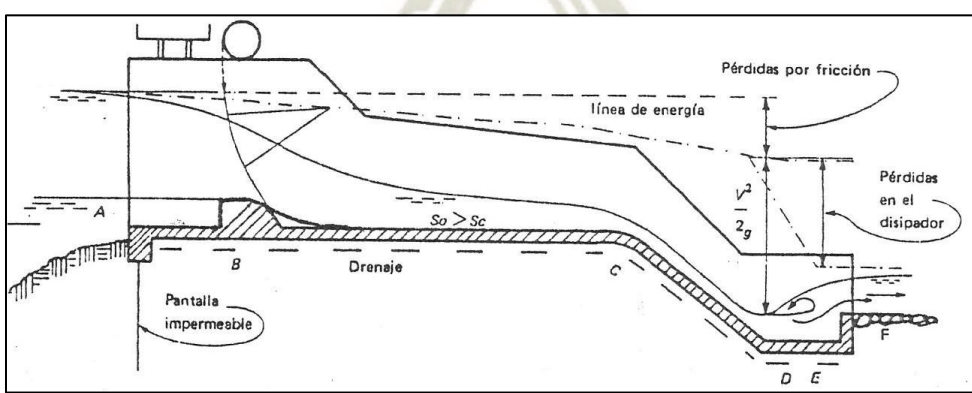


Figura 24 Vertederos con descarga directa en canal.

Fuente OBRAS HIDRAULICAS, F. Torres Herrera

2.6.13. Vertederos en tecla de piano

El vertedero tipo tecla de piano presenta una configuración en forma de zigzag, sin embargo, presenta algunas diferencias como los voladizos que suelen estar presentes en las teclas de entrada como de salida, y adoptar diferentes geometrías inclusive en algunos casos pueden llegar a presentar un fondo inclinado desde la base hasta la cresta del vertedero.

Este tipo de vertedero se originó a partir del vertedero tipo laberinto para poder mejorar su comportamiento hidráulico.

Su geometría es variada existiendo así diversos tipos de configuraciones como la triangular, trapezoidal, circular y rectangular.



*Figura 25 Vertedores en tecla de piano.
Fuente: Local Organizing Committee (LOC), 2017*

2.7. Fórmulas utilizadas para la estimación de coeficientes de descarga

2.7.1. Fórmula de King

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = 1.84LH^{1.47}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = 1.78LH^{1.47} \left\{ 1 + 0.56 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

2.7.2. Fórmula de Francis

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = 1.84LH^{3/2}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = 1.84LH^{3/2} \left\{ 1 + 0.2 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Consideraciones en los límites de la aplicación de esta fórmula

$$0.18m \leq H \leq 0.50m$$

$$2.40m \leq L \leq 3.00m$$

$$0.60m \leq P \leq 1.50m$$

Se debe procurar que:

$$L \geq 3H$$

2.7.3. Fórmula de Rehbock

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = C_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} LH^{3/2}$$

$$C_0 = \left(0.6035 + 0.0813 \frac{H}{P} + \frac{0.00009}{P} \right) \left(1 + \frac{0.0011}{H} \right)^{3/2}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = \left(1.787 + 0.236 \frac{H}{P} \right) LH^{3/2}$$

Consideraciones en los límites de la aplicación de esta fórmula

$$0.03m \leq H \leq 0.60m$$

$$0.30m \leq L$$

$$0.10m \leq P$$

2.7.4. Fórmula de Kindsvater y Carter

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} LH^{3/2}$$

Para vertederos rectangulares son contracción delgada:

$$C_e = 0.602 + 0.075 \frac{H}{P}$$

$$L_e = L - 0.001$$

$$H_e = H + 0.001$$

Consideraciones en los límites de la aplicación de esta fórmula

No se indica

2.7.5. Fórmula de Bazin

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = C_0 \frac{2}{3} LH^{3/2}$$

$$C_0 = \left\{ 0.405 + \frac{0.0027}{H} \right\} \left\{ 1 + 0.551 \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right\}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = \left\{ 1.794 + \frac{0.0133}{H} \right\} \left\{ 1 + 0.55 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\} LH^{3/2}$$

Consideraciones en los límites de la aplicación de esta fórmula

$$0.10m \leq H \leq 0.60m$$

$$0.50m \leq L \leq 2.00m$$

$$0.20m \leq P \leq 2.00m$$

2.7.6. Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos

Considerando la velocidad de Llegada.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_0 L H^{3/2} = 2.953 C_0 L H^{3/2}$$

$$C_0 = \left\{ 0.615 + \frac{0.615}{1000H + 1.6} \right\} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Consideraciones en los límites de la aplicación de esta fórmula

$$0.025m \leq H \leq 0.80m$$

$$0.30m \leq P$$

$$\frac{H}{P} \leq 1$$



CAPÍTULO III

Metodología de investigación

1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación por la cualidad de los datos se orientará a una investigación cualitativa; por su objetivo, esta será una tesis exploratoria, por la infestación en el objeto de estudio será experimental (experimento de laboratorio)

2. Diseño de la investigación

2.1. Vertederos en laberinto

EL vertedero en laberinto se desarrolló a partir de la idea de aumentar la longitud de desarrollo del mismo vertedero para un caudal y un ancho ya especificado para así necesitar menor altura de lámina vertiente. Esta longitud adicional se consigue realizando una configuración de zigzag con diferentes geometrías colocadas en serie a lo largo del aliviadero las formas que usualmente se utilizan son las triangulares y trapezoidales.

Los vertederos en laberinto también poseen muchas virtudes dentro de las cuales destacan su facilidad para ser puestos en cualquier lugar que se necesite una estructura de descarga que esté sujeta a las condiciones del lugar, también por su alta capacidad de descargar gran cantidad de caudal de agua cuando el ancho del vertedero es fijo, la elevación de la superficie de agua está limitada y deben de pasar grandes cantidades de agua.

Generalmente se utilizan de vertedero principal o secundario dentro de las presas en las que se han aumentado el caudal de diseño por consiguiente la capacidad de descarga del vertedero aumenta, siendo estos una buena alternativa en los métodos tradicionales de añadir otro aliviadero.

El comportamiento hidráulico de un vertedero en laberinto es muy complicado debido a los parámetros que afectan al caudal los cuales son la longitud del vertedero, la altura de la lámina de agua sobre el vertedero, el ángulo que las paredes forman con el vertedero. Básicamente el funcionamiento del vertedero está determinado por el comportamiento del caudal aguas arriba y aguas abajo del mismo

El vertedero del laberinto a lo largo de su investigación ha ido adoptando diferentes configuraciones geométricas incrementando así su capacidad de descarga a partir de observaciones y estudios hechos en prototipos y modelos. Según Cordero et al (2007), por requerimientos

topográficos y operativos, estos elementos han registrado variaciones que implican la modificación de sus coeficientes de descarga.

Según la vista en planta de los primeros vertederos en laberinto, tenía la forma rectangular o una forma de U, a esta modalidad se le llama Duckbill o pico de pato cuyos ciclos tienen una secuencia de paredes y ápices, logrando así conseguir una forma similar a una onda. Con esta configuración es que se incrementó el coeficiente de descarga en comparación con los resultados para un vertedero de cresta recta par aun mismo ancho de canal.

Todas estas modificaciones dieron lugar a una variedad de ensayos de diferentes vertederos con alteraciones en su forma y configuración de sus ciclos, intentando así mejorar su descarga aumentando la longitud de desarrollo de la cresta del vertedero.

En un inicio la disposición de diferentes ensayos trajo una configuración de los ciclos en triángulo, produciendo, así como consecuencia el vertedero que lleva su nombre, vertedero triangular, quien mostraba una disposición triangular de sus paredes según su vista en planta. Junto con esta configuración trajo algunas inquietudes como las interferencias de las láminas no aireadas en los vértices que disminuían su capacidad de descarga y reduciendo su eficiencia.

Luego se incorporaron otros elementos en cuyos vértices cortados, dando lugar a la configuración trapezoidal, la cual ha mostrado un incremento en los coeficientes de descarga del vertedero en laberinto.

Esta configuración es utilizada en los vertederos desarrollados para la regulación de embalses como una consecuencia de su gran capacidad de descarga y ventajoso diseño.

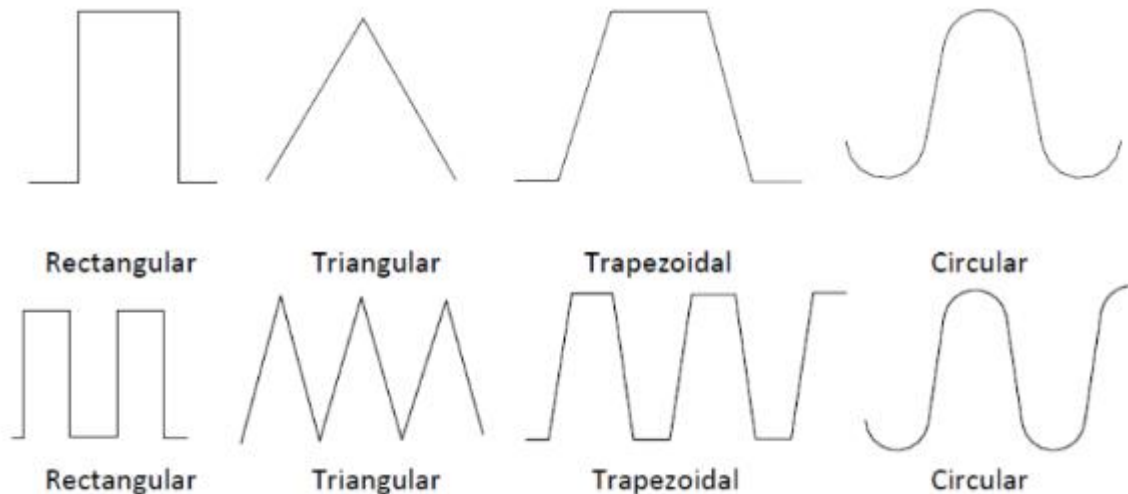


Figura 26 Vista en planta de vertederos en laberinto.

Fuente: *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*, Henry T. Falvey, 2003

2.2. Perfil de Cresta

Existen muchos tipos de perfiles de cresta, éstos son el acabado geométrico que poseen en su parte superior las paredes de un vertedero, la importancia que tiene estos elementos es debido a, que tienen gran influencia en los coeficientes de descarga del vertedor por consiguiente interviene también en su eficiencia hidráulica.

El diseño de los primeros perfiles en cuanto a su geometría se basó en los experimentos de Bazin en el siglo XIX y adoptaron la forma de una parábola simple que se ajustaba al recorrido de la caída de la lámina vertiente.

El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos de América realizó recientemente experimentos acerca de las láminas de descarga de los vertederos de pared delgada trayendo consigo numerosos diseños con respecto a la geometría de los perfiles de crestas.

Falvey (2003) y Magallanes (1985) desarrollaron perfiles cuyas características de dimensiones son propias de cada uno, sin embargo, en cuanto a la tipología hay una inclinación a utilizar el espesor base de la pared del vertedor. Asimismo, el uso de un perfil apropiado, que vaya de acuerdo al diseño de la pared del vertedero será de gran utilidad para aumentar la eficiencia en cuanto a la descarga del vertedero además de facilitar el proceso constructivo del mismo.

Dentro de los posibles diseños de perfiles de cresta, según Amanian (1987) indica que el de cuarto redondeo, es el más eficiente y práctico. En cuanto al diseño de estos perfiles podemos mencionar que existen dos configuraciones al respecto, una cuyo espesor se mantiene constante a lo largo del mismo, y otro cuyo espesor varía de forma tal que en su base es más ancha y va disminuyendo de manera constante hacia la parte superior.

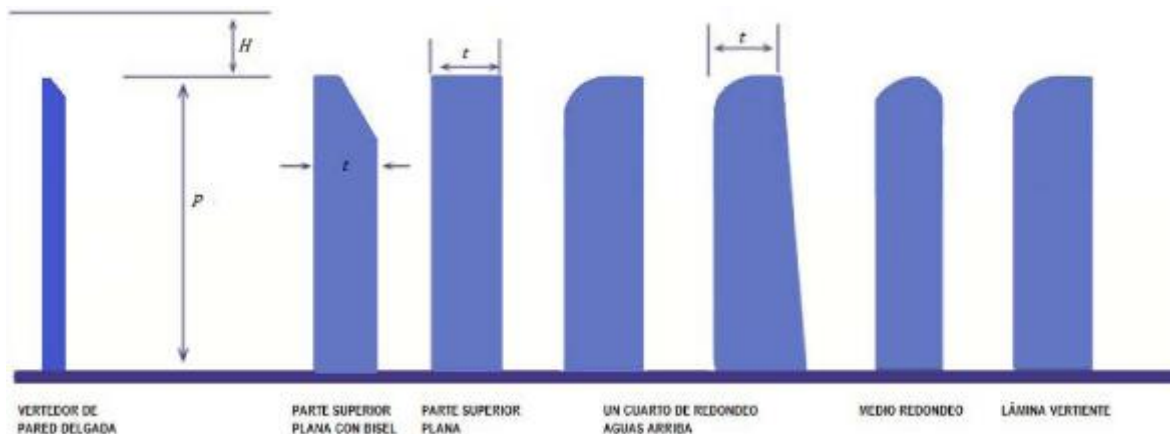


Figura 27 Perfiles de cresta utilizados comúnmente en los vertederos de laberinto.
Fuente: Erices, 2013

2.3. Coeficientes de descarga

La ecuación del gasto de descarga en términos de la carga total aguas arriba.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H_T^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

C_d : Coeficiente de descarga del vertedero de cresta controlada, adimensional

g : Aceleración de la gravedad, unidad en (m/s^2)

H_T : Carga total, medida hasta la superficie libre del agua, unidad en metros (m)

L : Longitud del vertedero, unidad metros (m)

Q : Gasto total que pasa sobre el vertedero, unidad (m^3/s)

Esta expresión es para flujos de vertederos con pared delgada, perfil de cuarto de redondeo, medio redondeo y lámina vertiente. Con la misma obtenemos el gasto de descarga correspondiente al perfil de cresta del vertedero.

Perfil de parte superior con Bisel

La descarga sobre un vertedero lineal está en función de la altura de carga sobre el vertedor, donde el coeficiente de descarga se define por el coeficiente de Rebbock:

$$C_0 = \left(0.6035 + 0.0813 \frac{H}{P} + \frac{0.00009}{P} \right) \left(1 + \frac{0.0011}{H} \right)^{3/2}$$

Donde:

C_d : Coeficiente de descarga del vertedero, adimensional

H_T : Carga sobre el vertedero, unidad en metros (m)

P : Altura de cresta, unidad en (m)

Perfil de un cuarto de redondeo

Para el perfil de cresta de cuarto de redondeo se utiliza como elemento geométrico un cuarto de circunferencia tangente al muro, en la parte adyacente a la descarga. Para la lámina vertiente que se producirá, se espera que ésta sea vertida libremente y sin producir cavitación.

Las pruebas experimentales realizadas en un vertedero lineal con perfil de cresta de cuarto de redondeo, por Tullis et al. (1995) muestran que cuando flujo se aproxima a una profundidad crítica en la que la carga aguas arriba se vuelve pequeña, el coeficiente de descargase se vuelve mínimo. Esto se puede observar en la gráfica siguiente:

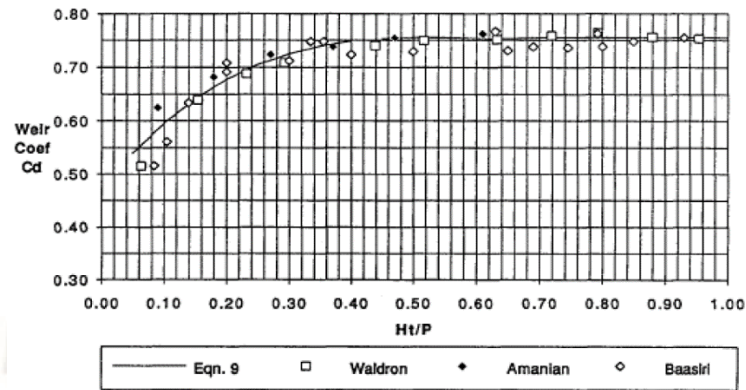


FIG. 2. Crest Coefficient for Linear Weir

Figura 28 Coeficiente de descarga para un perfil de cuarto de redondeo, par un vertedero lineal
Fuente: Tullis, J.P., Nosratollah, A., y Waldron D.,(1995)

Perfil de un cuarto de redondeo

En este tipo de perfil, su coeficiente de descarga se encuentra influenciado por el flujo por encima de la cresta. Se puede apreciar cuatro condiciones de flujo:

- Presión
- Atmosférica
- Cavidad
- Subatmosférica

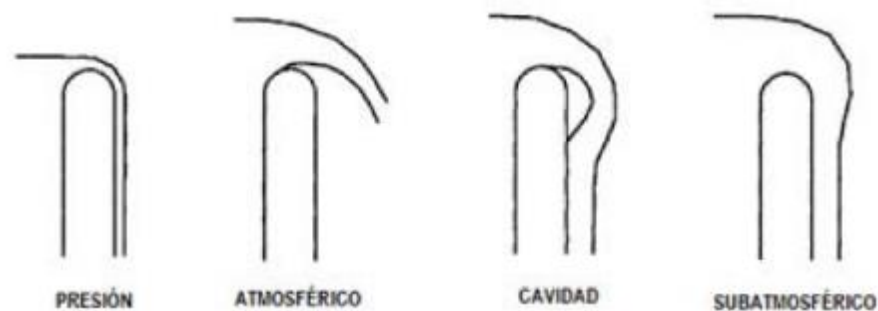


Figura 29 Condiciones de flujo.

Fuente: Falvey (2003)

Descripción de las condiciones de flujo:

- El flujo de presión es análogo a la descarga sobre una cresta Ogee, con una carga menor que la de diseño. La presión sobre toda la cresta es positiva (superior a la presión atmosférica).
- El flujo en condición atmosférico se alcanza cuando se eleva la carga sobre la cresta, es así que la lámina vertiente se separa de la pared del vertedero. Cuando la lámina de flujo aguas abajo es aireada, la presión en la cresta será la presión atmosférica.
- Cuando las cargas son mayores entonces es posible alcanzar la condición de flujo subatmosférico, este flujo se caracteriza debido a que la lámina vertiente no puede ser aireada, la lámina vertiente se adhiere al paramento aguas abajo del vertedero y por tanto la presión sobre la cresta se vuelve subatmosférica.
- Entre las condiciones que producen los flujos atmosférico y subatmosférico, puede formarse una bolsa o cavidad llamada cámara de aire. Esta cámara, dependiendo del nivel de agua aguas abajo, hará la transición entre el flujo atmosférico o subatmosférico. Por consiguiente esta condición es inestable.

La condición más conveniente es la atmosférica debido a que presenta la característica de separar su flujo de la cresta del vertedero, evitando así la erosión de la misma. Asimismo este flujo se descarga más alejado de la estructura evitando así los efectos de interferencia.

Estas condiciones están definidas por la presión sobre la cresta mediante un coeficiente:

$$\beta_p = \frac{\left(\frac{P_c}{\gamma Y}\right)}{Y_0}$$

Donde

P_c : Presión de la cresta, en kg/m^2

Y_0 : Profundidad del agua sobre la cresta, en metros (m).

γ : Peso específico, en kg/m^3

β_p : Coeficiente para definir la condición del flujo en función a la cresta, adimensional.

Teniendo en cuenta que:

$\beta > 0$, Condición de Presión

$\beta = 0$, Condición atmosférica.

$\beta < 0$, Condición subatmosférica o cavidad.

El coeficiente de descarga se encuentra en función a la carga sobre el vertedero, a la altura del vertedero y a su radio de curvatura.

$$C_d = f\left(\frac{H_T}{R}, \frac{H_T}{P}\right)$$

Para un flujo de presión y flujo sobatmosférico $\frac{H_T}{R}$ es el parametro más importante

Para un flujo aireado la relación $\frac{H_T}{P}$ es el parámetro más importante

2.4. Ahogamiento del vertedero y las interferencias entre láminas vertientes

A lo largo de diferentes investigaciones se ha podido observar la presencia de algunos fenómenos físicos relacionados entre sí, que se muestran durante la evacuación de caudales a través del vertedero. Estos son:

Ahogamiento del vertedor:

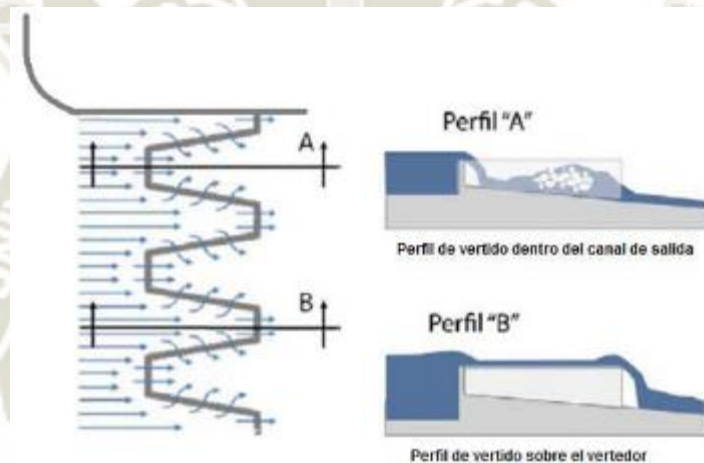
Ocasiona disminución en el rendimiento, debido al cambio de la relación de escala vertical, W/P . En su mayoría, éste fenómeno se produce debido a un mal diseño del canal aguas abajo del vertedero.

Interferencia de láminas:

Esto ocurre cuando los flujos de las láminas vertientes confluyen sobre los muros diagonales, este choque genera una gran pérdida de carga. En ocasiones el hecho de que la relación L/W sea mayor, puede producir que el fenómeno ocurra antes.

2.4.1. Ahogamiento del vertedor

Este fenómeno tiene un comportamiento parecido al de los vertedores convencionales, es decir que puede evitarse aumentando la pendiente del canal, o aumentando la altura de los vertederos en su cara aguas abajo. En los vertederos en laberinto se puede apreciar mejor su comportamiento hidráulico desde una perspectiva bidimensional como se ve a continuación en la imagen.



*Figura 30 Perfiles de vertido sobre el vertedor.
Fuente: Erices (2013)*

El comportamiento hidráulico se puede representar de mejor manera según la geometría en planta del mismo y por las condiciones hidráulicas que presenta aguas abajo del vertedero.

Fase 1: NO hay presencia de interferencias de láminas, entonces la capacidad de descarga es parecido al de un diseño de vertedero recto.

Fase 2: SI hay presencia de interferencia de láminas, en la parte superior de los muros diagonales, aguas arriba comienza la interferencia, y van aguas abajo a medida que aumentan los caudales. Donde existe la interferencia de láminas cabe resaltar que la aireación es deficiente.

En algunas investigaciones establecen que la sobreelevación sobre el vertedero es de 0.5 a 0.7 veces la altura del vertedero. Encontrando también que el Límite de ahogamiento para la descarga H_T es un vertedero lateral es de $\frac{2}{3}H_T$, medida a partir de la superficie de agua.

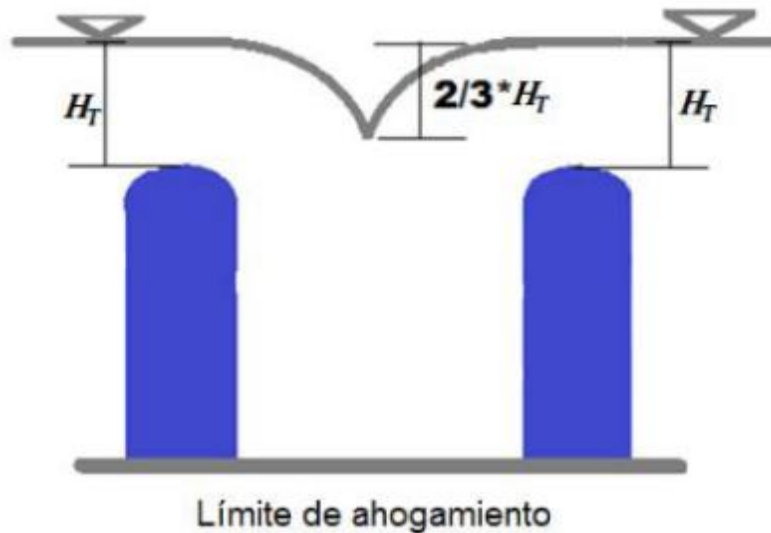


Figura 31 Límite de ahogamiento de un vertedero en laberinto.
Fuente: Erices, 2013

Cuando el nivel del agua (aguas abajo) se eleva por encima de la cresta del vertedero de cresta delgada, este se vuelve ahogado. Si el nivel del agua excede la cresta del vertedero de laberinto, el vertedero es ahogado y se reduce la velocidad del flujo sobre el vertedero. Bajo esta condición, la descarga depende no sólo de la carga aguas arriba, sino también de la carga aguas abajo (H_T). (Brater y King, 1976)

2.4.2. Interferencia de la lámina vertiente

Este fenómeno de interferencia se produce aguas arriba del vértice del vertedero en laberinto, provocando así una disminución en la eficiencia de descarga del vertedero debido al choque que se produce por las láminas vertientes del mismo.

Cuando en la descarga del vertedero, las láminas de las paredes laterales cerca al vértice chocan entre sí, pues se produce la interferencia, Este impacto tendrá lugar dentro de una longitud limitada de la cresta del vertedero.



Figura 32 Interferencia de láminas vertientes
Fuente Elaboración propia

Se ha observado que el número de ciclos del vertedero en laberinto influye en la interferencia de la lámina vertiente, teniendo una relación directamente proporcional en cuanto a las posibilidades de tener la presencia de este fenómeno.

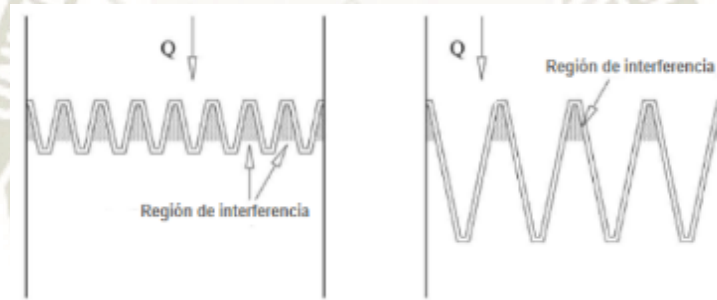


Figura 33 Influencia del numero de ciclos en la interferencia de la lámina vertiente.
Fuente: Crookston (2010).

Interferencia de la lámina vertiente de Indlefoker y Rouvé

Indlefoker y Rouvé tomaron el enfoque de estudiar el concepto de interferencia de lamina vertiente desde la forma de un vertidor en esquina de cresta delgada, pues esta tiene un comportamiento parecido al de un ciclo del vetedero en laberinto triangular, en donde el flujo se aproxima a sus paredes laterales de forma perpendicular.

Además definieron dos regiones para sus estudios en los vertederos ; La primera región se conoce com ozona de ahogamiento , esta toma en cuenta la longitud de ahogamiento (L_d). En esta zona el flujo de cada pared concurren, provocando un choque en las laminas vertientes. La segunda region

esta dada por un flujo perpendicular a las paredes laterales, en donde sus condiciones corresponden a las del flujo de un vertedero lineal por ende la descarga es libre sin presencia de choques entre las láminas vertientes.

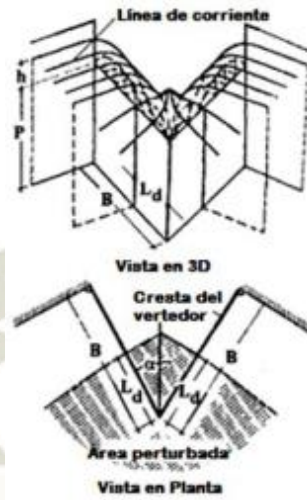


Figura 34 Interferencia de la lámina vertiente.

Fuente: Diseño de aliviaderos en laberinto, Henry T. Falvey, (2003)

Como resultados, Indlekofer y Rouvé concluyeron que los parámetros importantes para el grado de interferencia o área de ahogamiento del vertedero en laberinto de forma triangular son: la carga sobre el vertedero, h , la altura del vertedero, P , y el ángulo de la pared lateral, α .



Figura 35 Interferencia de la lámina vertiente.

Fuente: Aliviaderos tipo laberinto y en tecla de piano, Carlos Granell Ninot, (2006)

Cuando la descarga de un vertedero de esquina equivalente se hace pasar por encima de un vertedero lineal con una carga aguas arriba común, la diferencia entre la longitud del vertedero lineal requerida y la actual longitud del vertedero de esquina, es la que se define como longitud de perturbación efectiva L_{de} .

La longitud de perturbación (Falvey, 2003) efectiva, se calcula con la siguiente fórmula:

$$L_{de} = (1 - C_m)L_d = B - \frac{3Q}{2C_{d90}\sqrt{2gh_m}^{3/2}}$$

Donde:

C_m : Coeficiente de descarga medio en la zona de perturbación, adimensional

B : Longitud de la cresta de uno de los muros laterales, en metros.

h_m : Carga aguas arriba sobre la cresta, definida por Indlekofer y Rouvé (1975), en metros

L_{de} : Longitud de perturbación efectiva, en metros

C_{d90} : Coeficiente de descarga para un vertedero lineal, adimensional

Q : Gasto en m^3/s

Tyles Seamons considera los dos muros laterales de los ciclos del vertedero del laberinto pues considera que la longitud de perturbación está en función a ellos; sin embargo Falvey solo considera un solo lado del muro en su longitud lateral para hallar la longitud de perturbación.

$$L_{de} = (1 - C_m)L_d = 2l_c - \frac{3Q}{2C_{d90}\sqrt{2gh_m}^{3/2}}$$

Para la misma formula el parámetro l_c será la longitud del muro lateral de la cresta, en metros.

El coeficiente $C_{d_{90}}$ se calcula con la ecuación siguiente:

$$C_{d_{90}} = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu}$$

El parámetro μ se obtiene de las siguientes tablas dependiendo de el tipo de vertedero a utilizar, ya sean rectangulares o triangulares respectivamente.

Tabla 1. Determinación del coeficiente de gasto para vertederos rectangulares

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Hegly (Ref. 30) (1921)	$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS.
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Ref. 9) (Fórmula SIAS)	$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3(b/B)^2}{1000h + 1.6} \right] \times \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.025 \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertederos sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $\frac{h}{w} \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que la de Hegly.
Hamilton-Smith	$\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq \frac{w}{2}$ $b \leq (B - 2h)$ $\frac{h}{b} \leq 0.5$	Si $B(h+w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la Ec. (7.5) el valor de h por h' donde $h' = h + 1.4 \left(\frac{V_o^2}{2g} \right)$ donde: $V_o = \left[\frac{Q}{B(h+w)} \right]$ es la velocidad de llegada
Francis (Ref. 31)	$\mu = 0.623 \left[1 - 0.1n \frac{h}{b} \right] \left[\left(1 + \frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$V_o = \frac{Q}{B(h+w)}$ velocidad de llegada. $n = 2$ en vertederos con contracciones laterales $n = 0$ en vertederos sin contracciones laterales.
Rehbock (1929) (Ref. 9)	$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{1/2}$	$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.30 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$	Vale sólo para vertederos sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez.

Tabla 2 Determinación del coeficiente de gasto para vertedores triangulares.

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Universidad Católica de Chile (Ref. 24).	$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan(\theta/2) \mu K$	Vale para $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. La profundidad w no tiene influencia en el coeficiente de gasto.	μ , coeficiente experimental que depende de h y θ según la Fig. 7.9. K es otro coeficiente que depende de B/h según la Fig. 7.10 y vale 1 si $B/h \geq 5$ para $\theta = 90^\circ$ y si $B/h \geq 2.75$ para $\theta = 45^\circ$.
Gourley y Crimp (Ref. 31).	$C = \frac{1.32 \tan(\theta/2)}{h^{1.05}}$	Vale para ángulos θ de $45^\circ, 60^\circ$ y 90° y para profundidades w grandes.	Esta fórmula, substituida en la ecuación (7.11b), conduce a la ecuación: $Q = 1.32 \tan(\theta/2) h^{1.05}$
Hegly (1921) (Ref. 31).	$\mu = \left[0.5812 + \frac{0.00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[\frac{h^3}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ $0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ y profundidades w pequeñas	Es de las fórmulas más precisas para vertedores con ángulo en el vértice $\theta = 90^\circ$.
Barr (1909) (Ref. 22).	$\mu = 0.565 + \frac{0.0087}{h^{0.3}}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas $0.05 \text{ m} \leq h \leq 0.25 \text{ m}$ $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	El valor medio $\mu = 0.593$ que resulta de esta fórmula corresponde bastante al resultado de Thompson (1861) y que substituido en la Ec. (7.11a), conduce a la ecuación: $Q = 1.42 h^{1.8}$
Koch (1923) Yarnall (1926)	$\mu = 0.58$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes. $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	No se limita con precisión el rango de validez.
Heyndrickx (Ref. 30).	$\mu = [0.5775 + 0.214 h^{1.35}] \times \left\{ 1 + \left[\frac{h^3}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 60^\circ$ y cargas normales.	Es bastante precisa.

Para las longitudes de perturbación se definen del siguiente esquema

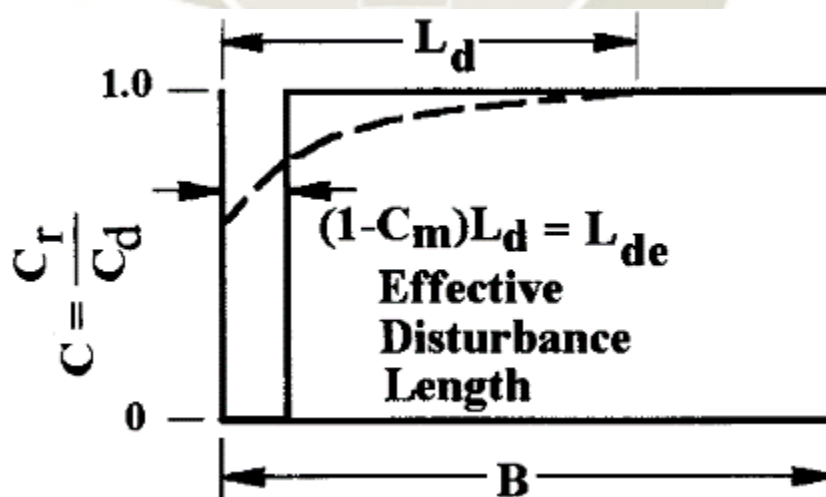


Figura 36 Definición de las longitudes de perturbación.
Fuente: Diseño de aliviaderos en laberinto, Henry T. Falvey, (2003)

Suposiciones para el cálculo:

- La lámina vertiente es estable.
- El vertedero es de cresta delgada.
- La cresta es totalmente aireada (condición atmosférica)

Indlekofer y Rouvé usaron dos definiciones para la longitud de perturbación:

1. Longitud de ahogamiento (L_d). - Es la longitud de la cresta sobre la cual la descarga se ve afectada por la interferencia.
2. La longitud efectiva (L_{de}). - Es la longitud del vertedero sobre la cual el coeficiente de descarga es igual a cero

El flujo sobre la longitud restante ocurre como si fuera un vertedero recto.

También se puede realizar la comparación entre la longitud efectiva L_{de} y la longitud de del muro lateral l_c como un cociente L_{de}/l_c del mismo para poder obtener de esta relación el grado de interferencia de la lámina vertiente sobre un vertedero; considerando que su eficiencia disminuye conforme los valores de este cociente L_{de}/l_c aumentan.

Indlekofer y Rouvé se dieron cuenta de que la longitud de la perturbación L_d tiende a incrementarse de forma lineal con la profundidad del flujo. Para estudiar el problema, utilizaron un coeficiente de perturbación de la siguiente manera:

$$C_d(l) = \frac{C_r}{C_d}$$

Donde:

C_r : Es el coeficiente de descarga reducido para el vertedero ocasionado por la interferencia, adimensional

C_d : Es el coeficiente de descarga para el flujo sobre una presa recta sin interferencia, adimensional.

La distribución de $C_d(l)$ a lo largo de la cresta y el valor medio del coeficiente de descarga reducido o Coeficiente de descarga medio en la zona de perturbación, C_m , se muestran en la figura siguiente.

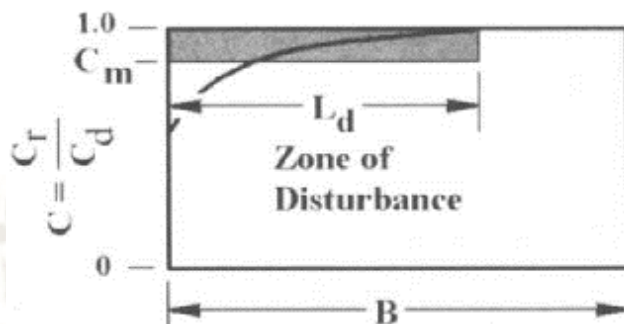


Figura 37 Distribución de $C_d(l)$ a lo largo de la cresta después de Indlekofer, H., y Rouve, G.,
Fuente: *Diseño de aliviaderos en laberinto*, Henry T. Falvey, (2003)

El valor medio de C_m se proporciona como una función del ángulo de la pared lateral en la Figura 38 que está dado como una función del ángulo lateral; éste dato es necesario para calcular la longitud de perturbación efectiva L_{de} . Un ángulo de 0° significa que las paredes del vertedero son paralelas al eje del canal, mientras tanto, un ángulo de 90° sugiere que el vertedero tiene una forma lineal.

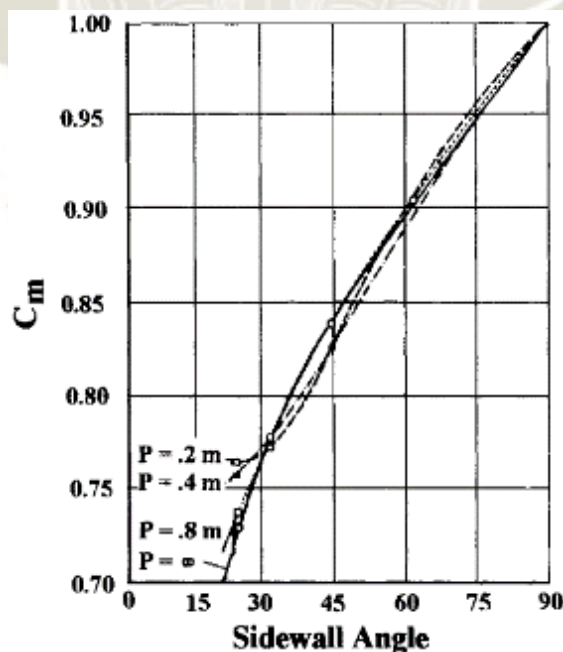


Figura 38 Dependencia de la reducción del coeficiente de descarga no dimensional en el ángulo de la pared lateral de Indlekofer, H., y Rouve, G., (1975)
Fuente: *Diseño de aliviaderos en laberinto*, Henry T. Falvey, (2003)

Interferencia de la lámina vertiente de Taylor

Taylor (1968) al realizar sus estudios, concluyo lo siguiente:

- La relación H_T/P debe ser menor o igual que 0.7 (relación de profundidad), esta relación es una medida del efecto de fricción de la pared lateral sobre el flujo sobre el vertedero.
- La relación w/P debe ser mayor que 2 (relación de altura)
- La relación H_T/w debe ser menor que 0.35

Manifiesta también que la relación de la longitud efectiva de ahogamiento con la longitud del muro es el parámetro que mejor describe la interferencia de láminas vertientes es el que relaciona

Interferencia de la lámina vertiente de Lux y Hinchliff

Lux y Hinchliff (1985), sigirieron que los parámetros geométricos relacionados con la interferencia de la lámina vertiente se encuentran en función de t/P y A/W

Recomendaron ademas lo siguiente:

- La relacion A/W deberia dde ser la menor posible par aincrementar el rendimiento del vertedero en laberinto
- $A/W \leq 0.0765$ para vertederos trapezoidales para evitar la disminución del rendimiento debido a la interferencia de laminas vertientes.

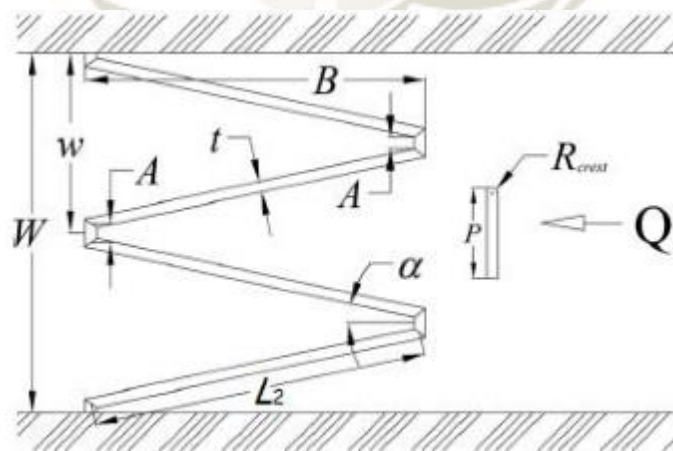


Figura 39 Variables definidas del vertedero en laberinto trapezoidal

Fuente: Modelamiento de vertederos en laberinto ,Rodríguez(2015)

Interferencia de la lámina vertiente de Tullis

Tullis(1995) recomendó lo siguiente:

- El ápice se debe reducir para incrementar la capacidad del vertedero.
- El ancho del ápice debe estar entre los valores $t \leq A \leq 2t$ siendo t el espesor de la pared del muro.

Interferencia de la lámina vertiente de Falvey

Falvey(2003) las láminas vertientes de dos vertederos colocadas en ángulo entre sí tendrán un impacto sobre una longitud limitada de la cresta de vertedero, haciendo que los chorros de las paredes laterales choquen entre sí, a este impacto se denomina interferencia de lámina vertiente. El efecto de la interferencia de la lámina vertiente es disminuir la descarga. A medida que el ángulo α entre paredes laterales disminuye y aumenta la carga sobre la cresta; entonces se incrementa la posibilidad de la existencia de esta interferencia

El efecto de la longitud de ahogamiento se puede apreciar en la siguiente figura donde, ocurre que cuando el número de ciclos disminuye, la relación de interferencia se vuelve más pequeña, y por consiguiente disminuye la interferencia. Para ello el ángulo es constante.

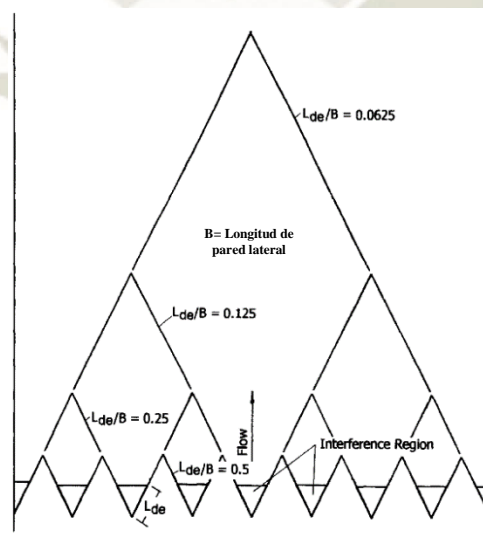


Figura 40 Representación gráfica de los efectos de interferencia

Fuente: Diseño de aliviaderos en laberinto, Henry T. Falvey,(2003)

2.5. Fenómeno de aireación

Llamamos aireación al fenómeno por medio del cual el aire es incluido en un fluido. Debido a la capacidad que tiene al aire de inhibir la cavitación es de gran utilidad en la gran mayoría de obras hidráulicas, en especial en aquellas que presentan flujos de alta velocidad.

Las estructuras que permiten la inclusión del aire en el fluido las conocemos como aireadores, las cuales poseen diferentes formas como la ranura, el escalón, o una combinación de ambos.

2.5.1. La necesidad de aireación

Los vertederos en laberinto son considerados una combinación de varios vertederos oblicuos, de pared delgada y cuya descarga es libre, además posee una capacidad de descarga mayor que la de los vertederos convencionales. El flujo en estos vertederos no es perpendicular a sus paredes laterales.

Su correcto funcionamiento está sujeto a algunos aspectos:

- Para lograr una mayor eficiencia el canal aguas arriba, debe ser recto y estar sin obstrucciones.
- La carga sobre la cresta del vertedero debe medirse a una distancia prudente aguas arriba para evitar la influencia de la curvatura de la superficie libre del agua en la proximidad del vertedero
- Existan condiciones atmosféricas debajo de la lámina vertiente

La condición lámina vertiente aireada se encuentra sujeta a la presencia de una cavidad de aire por detrás de dicha lámina, los efectos que esta cavidad puede ocasionar es la succión de la lámina vertiente sobre el vertedero; sin embargo para evitar este efecto se instalan sistemas de aireación. El tipo de aireación se encuentra condicionada a la forma de la cresta, la altura de las paredes laterales del vertedero del laberinto, la turbulencia y la carga de velocidad.

De acuerdo a estudios realizados de los efectos que ocasiona éste fenómenos se han propuesto algunas recomendaciones clasificadas en tres grupos

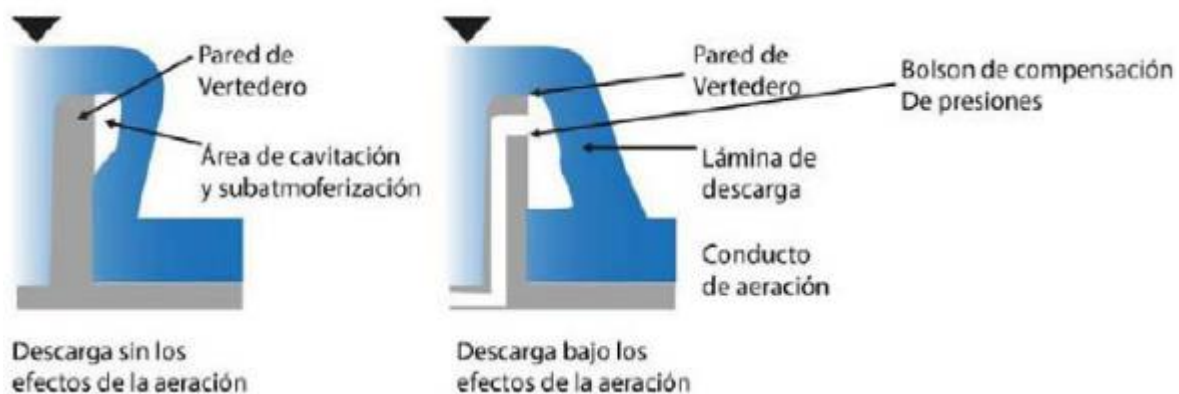
- El diseño y la construcción
- El mejoramiento de la resistencia de las superficies expuestas a cavitación
- La aireación de las obras

En lo que al diseño y construcción respecta, se entiende que para evitar el fenómeno de cavitación se necesitan realizar acabados que presentan muy poca rugosidad. Esto, hoy en día, es muy difícil de conseguir debido al material convencional que utilizamos.

En cuanto al mejoramiento de la resistencia de las superficies expuestas, se ha comprobado que las sustancias epóxicas presentan problemas de adherencia. Además, también los agregados mejorados del concreto como polvillo o fibras de acero, son focos de cavitación, descartando también esta opción.

La aireación de las obras al parecer es la opción más viable en sus formas más comunes como la ranura, el escalón, el deflector o la combinación de estos.

La aireación del flujo es muy importante ya que de esta manera se puede mejorar la capacidad de descarga del vertedero en laberinto al compensar las presiones negativas que se generan bajo la lámina vertiente. (Hauser, 1995).



*Figura 41 Esquema de la Aireación debajo de la descarga del vertedero
Fuente: Erices,2013*

Cuando no se presenta aireación en la descarga del flujo, se produce el efecto de la cavitación, es necesario entonces suministrar un sistema de aireación al flujo con el fin de compensar las presiones negativas y minimizar el efecto de succión; entonces bajo la condición de aireación lo que se logra es que con la compensación de las presiones negativas se produzca una descarga de lamina vertiente libre a la atmósfera Esta se presenta cuando la lamina vertiente se separa de la pared del vertedero. (Sartor,2011)

LA cavitación es un efecto inestable y no deseado, que solo disminuye el coeficiente de descarga, sino que también crea erosión, misma que afecta las paredes del vertedero y las canaletas de descarga (Delgado,2009).

2.5.2. El problema de Cavitación.

La cavitación es un fenómeno donde en un fluido se forman pequeñas cavidades de vapor de agua, debido a que éste se somete a una baja presión brusca y aumento en su velocidad. Estas cavidades llegan a implosionar causando así graves daños a la estructura expuesta.

Para los niveles de cavitación existe una clasificación desde su inicio o también llamada cavitación incipiente, hasta la etapa donde forma estelas huecas o supercavitación.

En obras de excedencias se entiende que comienza la cavitación cuando aparecen manchas blancas en las superficies que se encuentran sometidas a altas velocidades.

Para expresar las condiciones de cavitación contamos con el número de Thomas o índice de cavitación (σ)

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{V^2/2g}$$

Donde:

σ : Índice de cavitación, adimensional.

h_p : Carga de presión en la zona de interés, en metros.

h_v : Carga de vapor del líquido, con un valor aproximado de -8m, en metros.

v : Velocidad del flujo, en m/s

$\frac{v^2}{2g}$: Carga de velocidad en zona de interés, en metros.

g : Aceleración de la gravedad, en m/s^2

V : Velocidad característica del flujo, que en caso de ser la velocidad media estará dada por $V = \sqrt{2gH}$, donde H es la distancia vertical entre la superficie libre en el vaso y la parte superior del escurrimiento de la sección de interés.

La carga de vaporización h_v depende del grado de pureza y temperatura del líquido, a menos temperatura y mayor pureza, menos carga h_v . Para el agua a una temperatura ambiente, h_v tiene un valor comprendido entre -9.30m y -9.90m

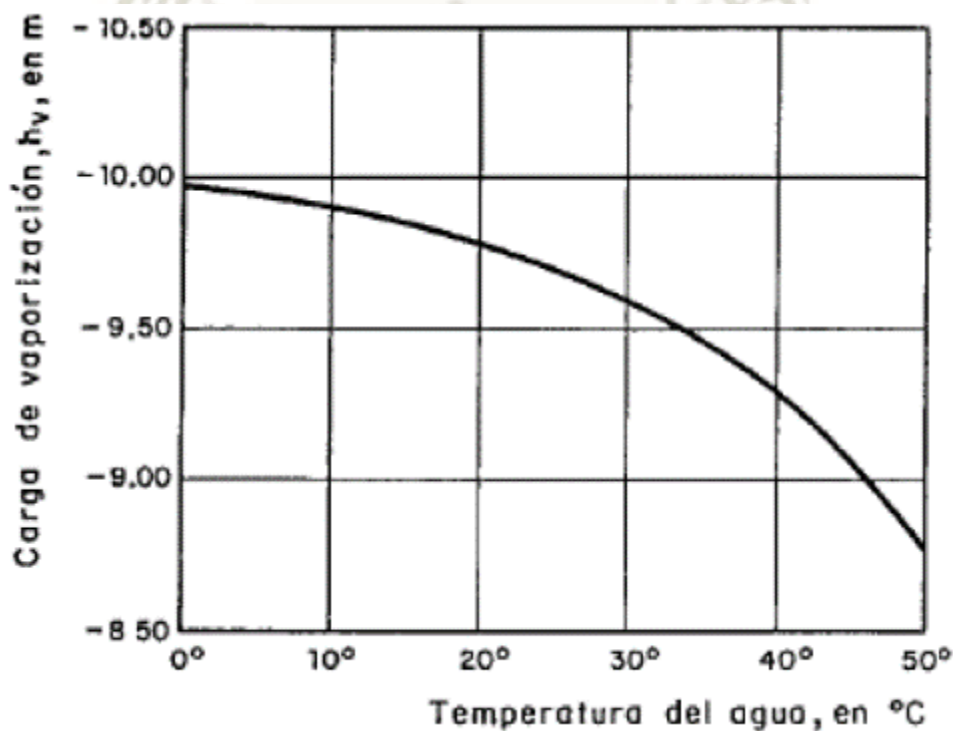


Figura 42 Esquema de la variación de la carga de vaporización con la temperatura
Fuente: Erices,2013

La existencia de la posible aparición del fenómeno de cavitación en una obra puede determinarse comparando los valores de la cavitación incipiente σ_1 hallada de forma experimental con los mismos parámetros de la obra en cuando a superficie, carga de presión y velocidad, estas deben

ser al momento inicial de la cavitación; con el índice de cavitación σ que se presenta durante la operación.

Entonces podemos encontrar que la relación del índice de cavitación es inversamente proporcional a la velocidad del flujo, en conclusión, a mayor velocidad de flujo, menor será su presión y por ende habrá mayores posibilidades de que ocurra este fenómeno.

$\sigma > \sigma_1$ No presentara daños la estructura por cavitación.

$\sigma < \sigma_1$ Si presentara daños la estructura por cavitación.

Hay cuatro características que deben ser observadas para poder realizar un análisis de la posibilidad de la ocurrencia de cavitación en una obra.

- La rugosidad de su superficie
- La geometría del vertedero, esto implica su radio de curvatura, curvas verticales, cambios bruscos en su forma.
- Protuberancias y escalones en general.
- Desalineamiento en la conducción, ejemplo las transiciones de cambio en vertederos de túnel, cuya sección varía de rectangular a circular.

Teniendo claro que el fenómeno de cavitación es un efecto indeseable en cualquier obra de hidráulica, es que necesitamos contar con métodos que nos ayuden a verificar si una obra será afectada por daños de cavitación; para ello existen algunos procedimientos para identificar estas probabilidades de cavitación en irregularidades aisladas, como son los métodos Colgate, Echávez y Falvey.

Método de Donald Colgate. - Realizó pruebas de laboratorio sobre probetas tomadas de la presa Davis, considerando la ley de distribución de velocidades propuesta por Prandtl.

Método de Echávez.- Evaluó el índice local de cavitación σ_k para una superficie sujeta a ciertas condiciones hidráulicas, y compararlo con el índice de cavitación local incipiente σ_1 de tal forma que si $\sigma_k > \sigma_1$ entonces existía la posibilidad de cavitación.

Método de Falvey.- útil para predecir daños por cavitación en vertedores de túnel a partir de un análisis histórico de información acerca de lo daños que ha sufrido diferentes presas. Elaboró una gráfica Relacionando el índice de cavitación, el tiempo de operación y su posibilidad de daño.

2.5.3. Aireación de los vertedores

Una protección efectiva en contra de los daños que la cavitación produce en estructuras hidráulicas es entonces la inclusión de aireadores en el escurrimiento de los vertedores, ya que actúan como estabilizadores de presiones negativas, evitando el colapso de las burbujas de aire. Es éste un método eficaz inclusive con un reducido porcentaje de aire en el agua como el 8% protegerá las superficies de la estructura. (Peterka, 1953; Russell y Sheehan, 1974).

Aireación Inducida:

Llamamos aireación inducida al proceso de inclusión del aire a través de unos dispositivos artificiales realizados en obra entre los más comúnmente utilizados contamos con: El deflector, la ranura, el escalón o una combinación de ellos.

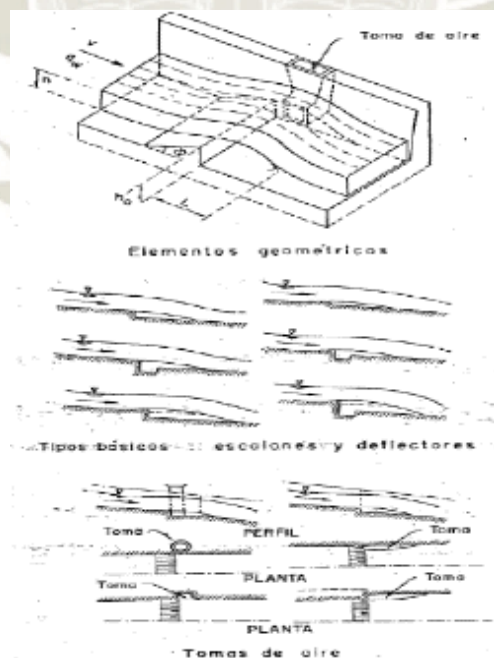


Figura 43 Geometría de vertedores
Fuente: Castellano, 2003

- Deflectores. - Estos son muy útiles cuando se trata de gastos considerables, pues son buenos introduciendo grandes cantidades de aire, son también una buena alternativa por su fácil construcción en obra. Son más utilizados en obras de canales a cielo abierto.
- Ranura.- Estos tiene la facilidad de ahogarse con pocas cantidades de caudal, su drenaje es deficiente, son más utilizados en túneles por su fácil instalación.
- Escalón. - La ventaja de los escalones es que generan pocos disturbios en el flujo de agua.

Por las razones explicadas anteriormente es aconsejable que las estructuras antes mencionadas sean utilizadas de manera combinada y no aislada.

Aireación natural

Ese tipo de aireación se presenta como parte de los fenómenos ed salto hidráulicos, flujos de alta velocidad, vórtices, es decir en flujos supercríticos al exceder cierta velocidad, o en una rápida de vertedero, cuando el desarrollo de la capa límite alcanza la superficie libre del agua, llamado punto de inserción, inicia una zona de flujo parcialmente aireado, que aguas abajo se convierte en totalmente aireado, donde la superficie del agua es blancuzca y el tirante se incrementa debido al aire incorporado al escurrimiento.(Rodríguez, 2015)

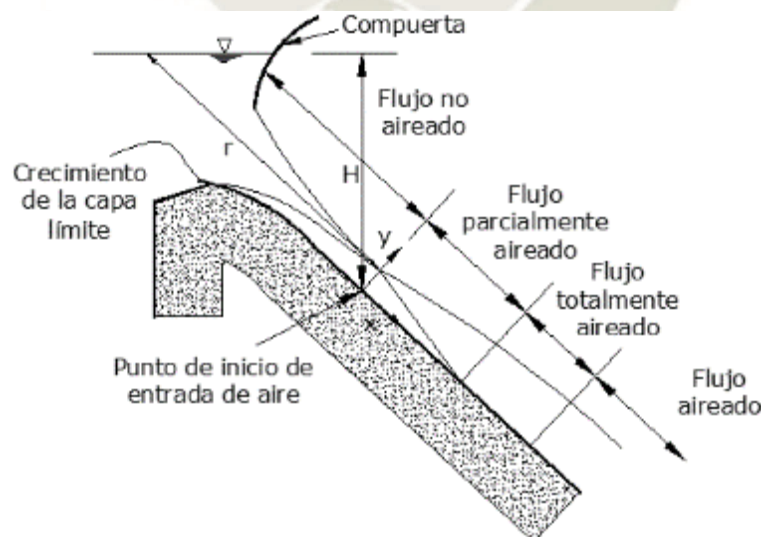


Figura 44 Regiones de crecimiento de la capa límite y de aireación
Fuente: Echávez,1979.

En la figura 44 se distinguen cuatro zonas:

- a) Flujo no aireado, se caracteriza debido a que el espesor de la capa límite no alcanza la superficie del escurrimiento.
- b) Flujo parcialmente aireado, aquí el aire de la atmósfera es parcialmente atrapado por la turbulencia
- c) Zona totalmente aireada, la superficie del agua atrapa burbujas de aire relativamente grandes, de 10mm a 20 mm, que a su vez son disgregadas debido a la turbulencia del flujo.
- d) Región de flujo uniforme, es donde la inclusión del aire es equilibrada con la pérdida del mismo, por la flotación de las burbujas, no teniendo variaciones de concentraciones de aire con respecto a la profundidad.

Condiciones de aireación

La condición de aireación de la capa vertiente en un vertedero en laberinto influenciará directamente en la eficiencia de descarga de éste; sin embargo al inhibir el fenómeno de la cavitación mediante la aireación se podrían presentar algunos efectos colaterales no muy favorables. Estos podrían ser el ahogamiento o derrame del agua debido al incremento del tirante del flujo provocado por la deflexión del chorro y la inclusión del aire.

En un vertedero en laberinto se presentan las siguientes condiciones de aireación.

- Adherida:
Esta condición se refiere a que la lámina vertiente de agua se adhiere a la pared del paramento del vertedero aguas abajo para algunos valores pequeños de la relación $\frac{H_T}{P}$
- Aireada:
Esta condición se refiere a la existencia de una cavidad de aire ubicada entre la pared del paramento del vertedero y la lámina vertiente .

- Parcialmente aireada:
Esta condición se refiere a que que inestable su comportamiento debido al aumento de la relación $\frac{H_T}{P}$
- Ahogada:
Esta condición se refiere a que para valores altos de $\frac{H_T}{P}$ la lámina vertiente obtiene una trayectoria inestable u oscilante.

Para que haya una lámina vertiente más eficiente se considera que la condición de lámina adherida es la más idónea que la aireada debido a que en esta última las presiones subatmosféricas se desarrollan en la cara del vertedero aguas abajo.

Funcionamiento de los aireadores

EL comportamiento del flujo en la región afectada por el aireador puede separarse en cinco regiones (Chanson, 1996):

- Región de llegada de flujo: Zona donde se presenta flujo supercrítico, debido a la aireación natural puede o no traer aire en la parte superior.
- Transición: Zona donde cambia de dirección el escurrimiento y el nivel de turbulencia aumenta favoreciendo la inclusión de aire.
- Región de Aireación: Zona donde por la acción de la ranura el agua succiona aire por debajo y además también por encima de la superficie libre por la turbulencia aumentada por la rampa.
- Región de impacto: En esta zona aquí el flujo alcanza su máxima aireación; sin embargo disminuye rápidamente debido a que también aquí se produce un impacto con la plantilla, produciendo así un aumento de presión en el chorro y expulsando así el aire adherido a la plantilla hacia arriba.
- Región aguas abajo del impacto: Aquí el flujo incrementa su tirante debido al cambio de dirección ocasionado por la rampa y la inclusión de aire.

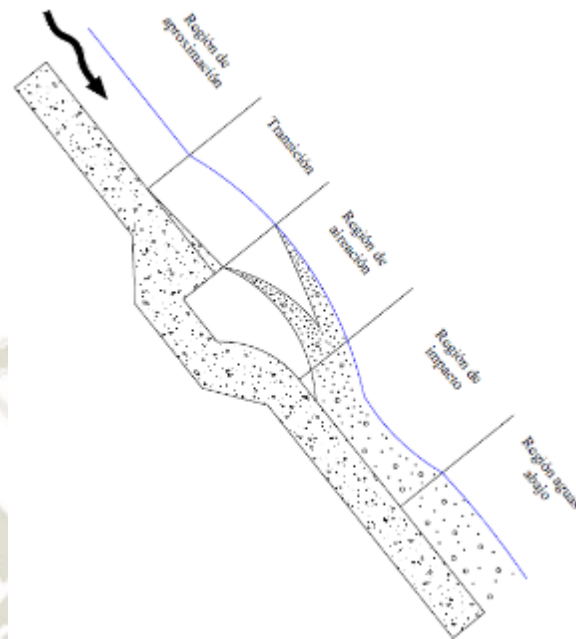


Figura 45 Flujo en una ranura aireadora
Fuente: Chanson,1996.

2.6. Curvas de diseño

En el diseño de vertederos en laberinto, es necesario tener en cuenta que algunos parámetros incluidos en su geometría deben de ser optimizados tales como el número de ciclos “ n ”, su longitud “ b ” y el ángulo de la pared lateral “ α ” de tal forma que se definirá la mejor cresta para su mejor ajuste al espacio disponible o ancho de canal “ W ”.

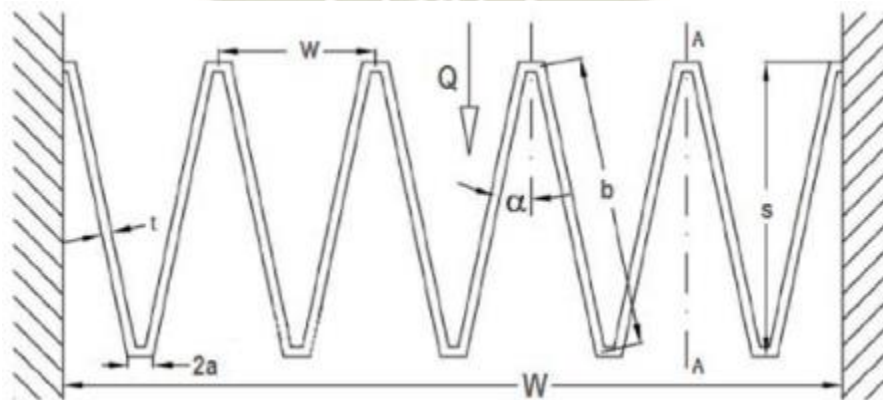


Figura 46 Flujo en una ranura aireadora

Fuente: Chanson,1996

Las investigaciones más resaltantes en cuanto a herramientas de cálculo para el diseño de vertederos en laberinto son presentadas por Tullis et al. (1995), Magallanes (1983) y Granell y Toledo (2010).

Rouse (1936) demostró que la velocidad de aproximación no es una variable independiente. Lo que es un parámetro que tiene influencia sobre el vertedero en laberinto es la geometría del canal aguas arriba mas no la velocidad de aproximación.

Cassidy et al. (1985) demostró que la carga aguas arriba del vertedero se podría utilizar al momento de determinar su coeficiente de descarga. Esto quiere decir que debemos de seleccionar la curva adecuada de carga para emplear las curvas de descarga y así hallar correctamente su gasto.

Algunos modelos físicos han brindado información a los investigadores acerca del diseño de vertederos en laberinto a continuación se mostrarán en la tabla siguiente:

Tabla 3 Método de diseño del vertedero en laberinto

Métodos de diseño			
O	Autores	Tipo de ciclo del vertedor de laberinto*	Forma de la cresta**
1	Taylor (1968), Hay y Taylor (1970)	Tri, Trap, Rect	Parte superior plana con bisel, Medio redondeo
2	Darvas (1971)	Trap	Cuarto de redondeo con la base mayor
3	Hinchliff y Houston (1984)	Tri, Trap	Parte superior plana con bisel, Cuarto de redondeo
4	Lux y Hinchliff (1985)	Tri, Trap	Cuarto de redondeo
5	Magalhaes y Lorena (1989)	Trap	WES
6	Tullis et al. (1995)	Trap	Cuarto de redondeo
7	Melo et al. (2002)	Trap	Cuarto de redondeo con la base mayor
8	Tullis et al. (2007)	Trap	Medio redondeo
9	Lopes et al. (2008)	Trap	Cuarto de redondeo con la base mayor

* Tri=triangular
* Trap= trapezoidal
* Rec=rectangular

**Cuarto de redondeo ($R_{cresta} = tw/2$)
**Cuarto de redondeo con la base mayor ($R_{cresta} = tw$)

A lo largo de las investigaciones los investigadores tienen diferentes opiniones acerca de las curvas de descarga para vertederos en laberinto. Unos utilizan la carga ubicada por encima del vertedero y otros la carga total aguas arriba del vertedero (carga del vaso de almacenamiento). Las curvas de descarga también han sido utilizadas para diferentes ubicaciones del vertedero, ya sea al inicio del canal o dentro del canal.

Las curvas de diseño más comunes para el coeficiente de descarga de son:

- Curvas de diseño de Taylor.
- Curvas de diseño de Darvas.
- Curvas de diseño de Magalhães y Lorena.
- Curva de diseño de Lux.
- Curva de diseño de Tullis.

Curva de diseño de Taylor

Las curvas de diseño de Taylor muestran la relación entre la descarga de un flujo para un vertedero en laberinto con la descarga de un flujo para un vertedero lineal teniendo un mismo ancho de canal. Dicho experimento tuvo mucha utilidad para no considerar los efectos de tensión superficial en las pruebas del modelo.

$$\frac{Q_L}{Q_N} = f(H_T/P, Geometría)$$

Donde:

Q_L : Gasto total en el vertedero de laberinto

Q_N : Gasto en un vertedero lineal con el mismo ancho de canal aplicado al vertedero de laberinto

H_T : Carga sobre el vertedero.

Las curvas de Hay y Taylor que se muestran a continuación son para un vertedero de laberinto ubicado en el canal.

Triangular

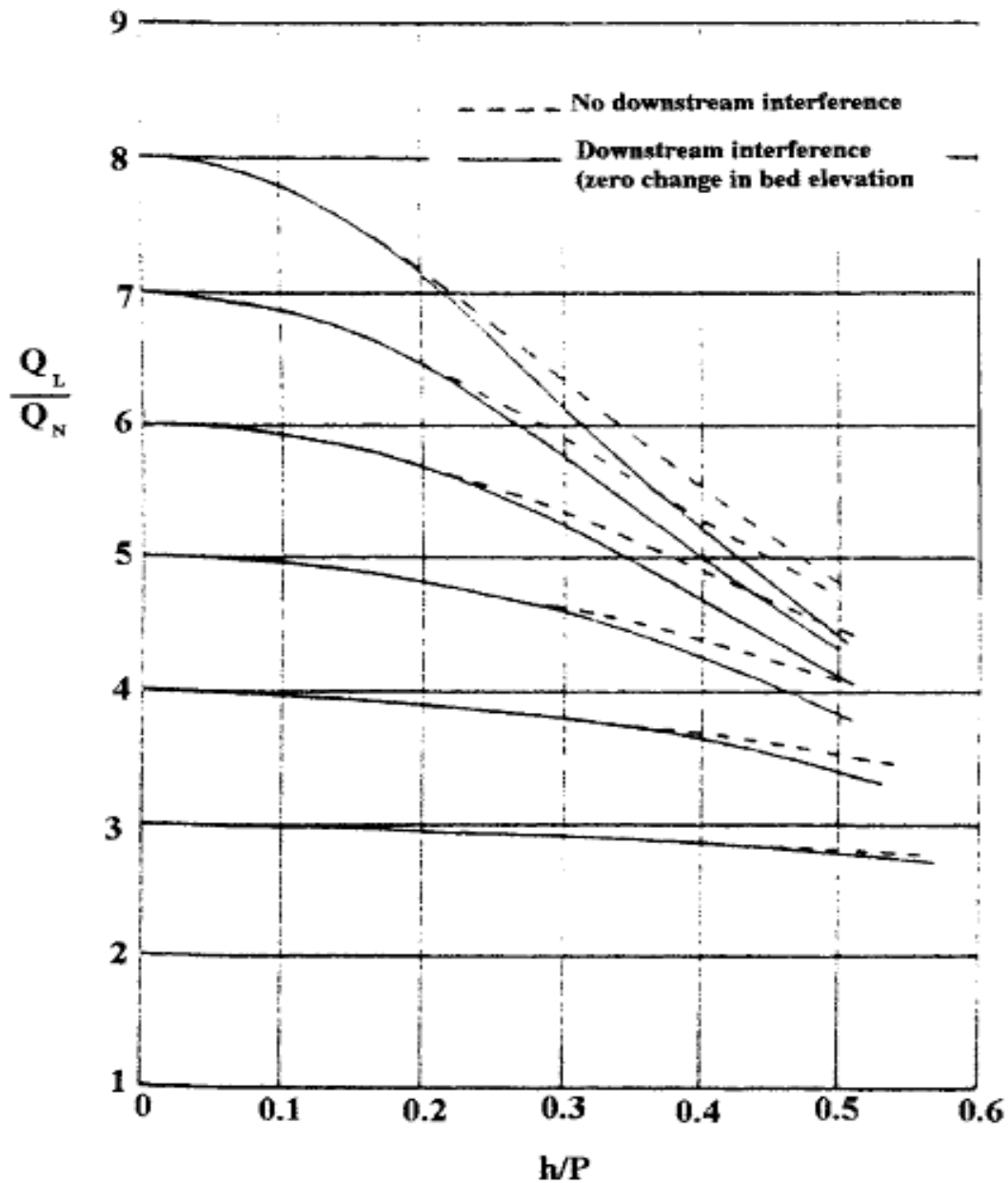


Figura 47 Curva de diseño para vertedero triangular de cresta plana con bisel

Fuente: Hay, N., and Taylor, G., (1970). Falvey (2003)

Trapezoidal

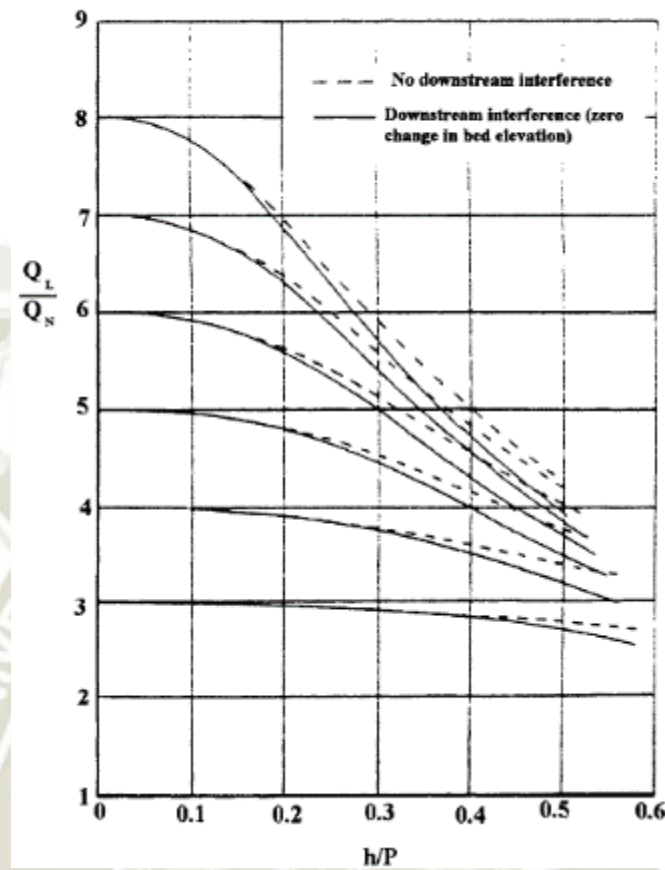


Figura 48 Curva de diseño para vertedero trapezoidal de cresta plana con bisel

Fuente: Hay, N., and Taylor, G., (1970). Falvey (2003)

La descarga para un vertedero recto se determinó con la ecuación de Kindsvater y Carter (1959)

$$Q_N = C_s L_e h_e^{3/2}$$

Donde:

EL coeficiente de descarga C_s se encuentra dada por la siguiente expresión:

$$C_s = 3.22 + 0.40 \cdot \frac{H_T}{P}$$

La longitud de la cresta L_e se encuentra dada por la siguiente expresión:

$$L_e = L - 0.003ft$$

La carga sobre el vertedero h_e se encuentra dada por la siguiente expresión:

$$h_e = H_T + 0.003ft$$

En donde L_e es la longitud efectiva; H_T es la carga total; y h_e es la carga equivalente de la cresta.

Se debe resaltar que en la ecuación $h_e = H_T + 0.003ft$ Se encuentra en unidades del sistema inglés así que no es dimensionalmente homogénea. Las correcciones a la longitud y a la carga solo se hacen significativos para valores pequeños de h/P que podría ser observado en modelos físicos. Para el prototipo, estas correcciones son insignificantes.

Curvas de diseño de Darvas

Darvas (1971) expresó el coeficiente de descarga con la siguiente formula:

$$C_w = \frac{Q_L}{W \cdot H_T^{1.5}}$$

Donde:

C_w : Coeficiente de descarga de Darvas, en $ft^{0.5}/s$

H_T : Carga total aguas arriba, en pies.

Q_L : Gasto total, en ft^3/s

W : Ancho de vertedero del laberinto, en pies.

Gráficos de las curvas de Darvas se encuentran en función de:

$$C_w = f(H_T/P, L/W)$$

Para la cual “ L ” es la longitud de desarrollo del vertedero en laberinto.

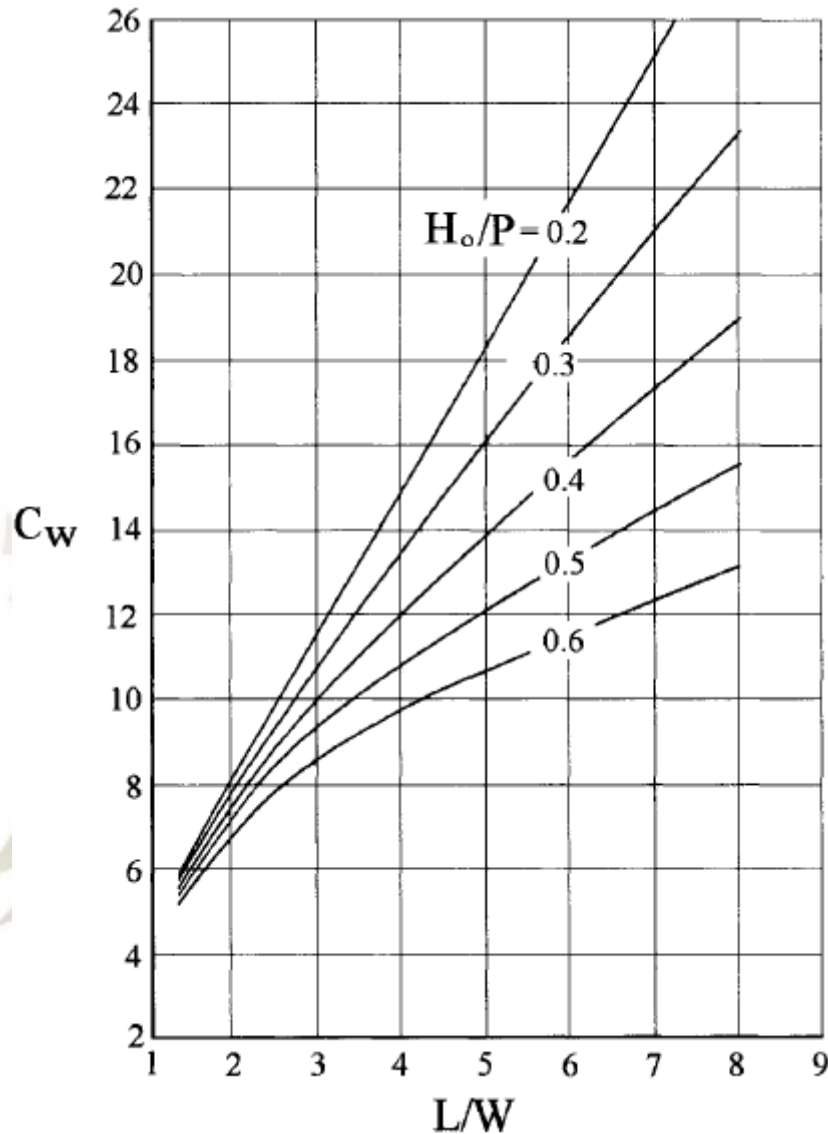


Figura 49 Curva de diseño de Darvas

Fuente: Falvey (2003)

Curvas de diseño de Magalhães y Lorena

Magalhães y Lorena (1989) realizaron curvas similares a las de Darvas, con la excepción de que estas son para aplicables a la lámina vertiente o cresta Ogge y su coeficiente de descarga está dado en términos adimensionales.

$$C_p = \frac{Q_L}{W\sqrt{2gH_T}^{1.5}}$$

Donde:

C_p : Coeficiente de descarga, adimensional

Q_L : Gasto total, en m^3/s

H_T : Carga total aguas arriba, en metros.

W : Ancho del vertedero en laberinto, en metros.

Las curvas de Magalhães y Lorena se muestran en la siguiente figura.

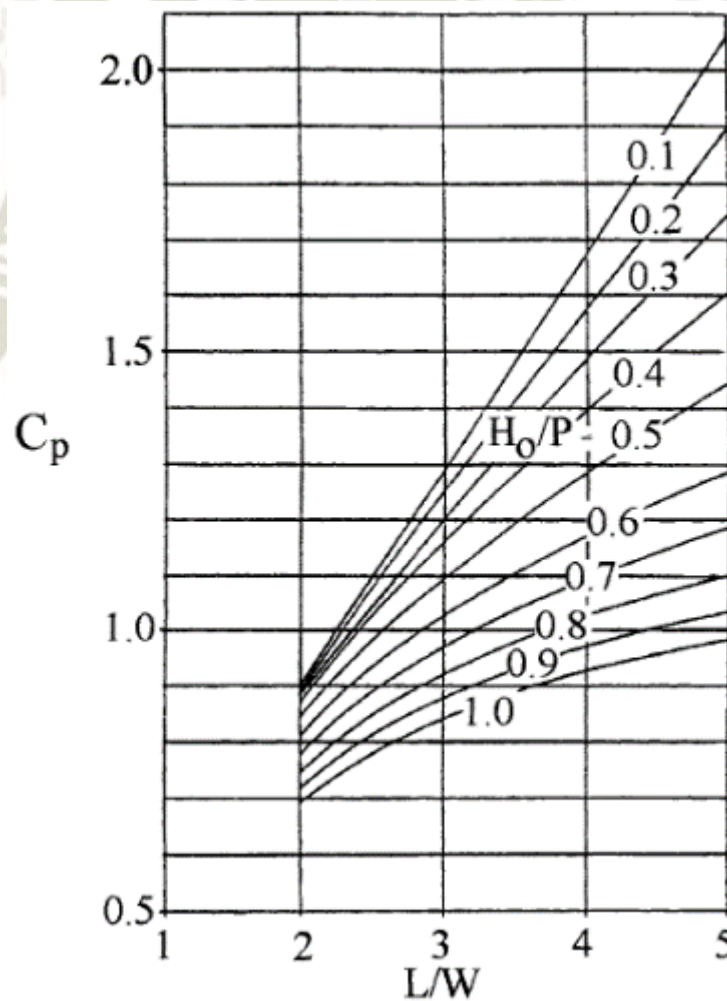


Figura 50 Curva de diseño de una cresta Ogee de Magalhães y Lorena.

Fuente: Falvey (2003)

Curvas de diseño de Lux

Lux (1989) se basó en la carga total de aguas arriba para hallar su coeficiente de descarga. Su relación para la descarga de un ciclo está dada por:

$$Q_x = C_w \left(\frac{W_c/P}{W_c/(P+k)} \right) W_c \cdot H_T \cdot \sqrt{g \cdot H_T}$$

Donde:

C_w : Coeficiente de Lux

k : Constante de forma

H_T : Carta total aguas arriba, en metros.

g : Aceleración de la gravedad en m/s^2

Q_c : Gasto de un Ciclo, en m^3/s

W : Ancho del ciclo, en m

Lux encontró que k es 0.18 para las formas planas triangulares y 0.1 para las formas planas trapezoidales cuando a/W_c era igual a 0.0765, en donde “ a ” es la mitad del ancho de la cara corriente arriba del laberinto, como se muestra en la Figura 51. Los subíndices “ c ” se refieren a un solo ciclo y no a todo el ancho del laberinto. Para ciclos múltiples, la descarga dada por esta ecuación debe multiplicarse por el número de ciclos, “ n ”

$$Q_L = Q_c \cdot n$$

Las curvas de Lux y Hinchliff relacionan H_T/P y L/W y se muestran en la siguiente figura para vertederos triangulares y trapezoidales respectivamente:

Triangular

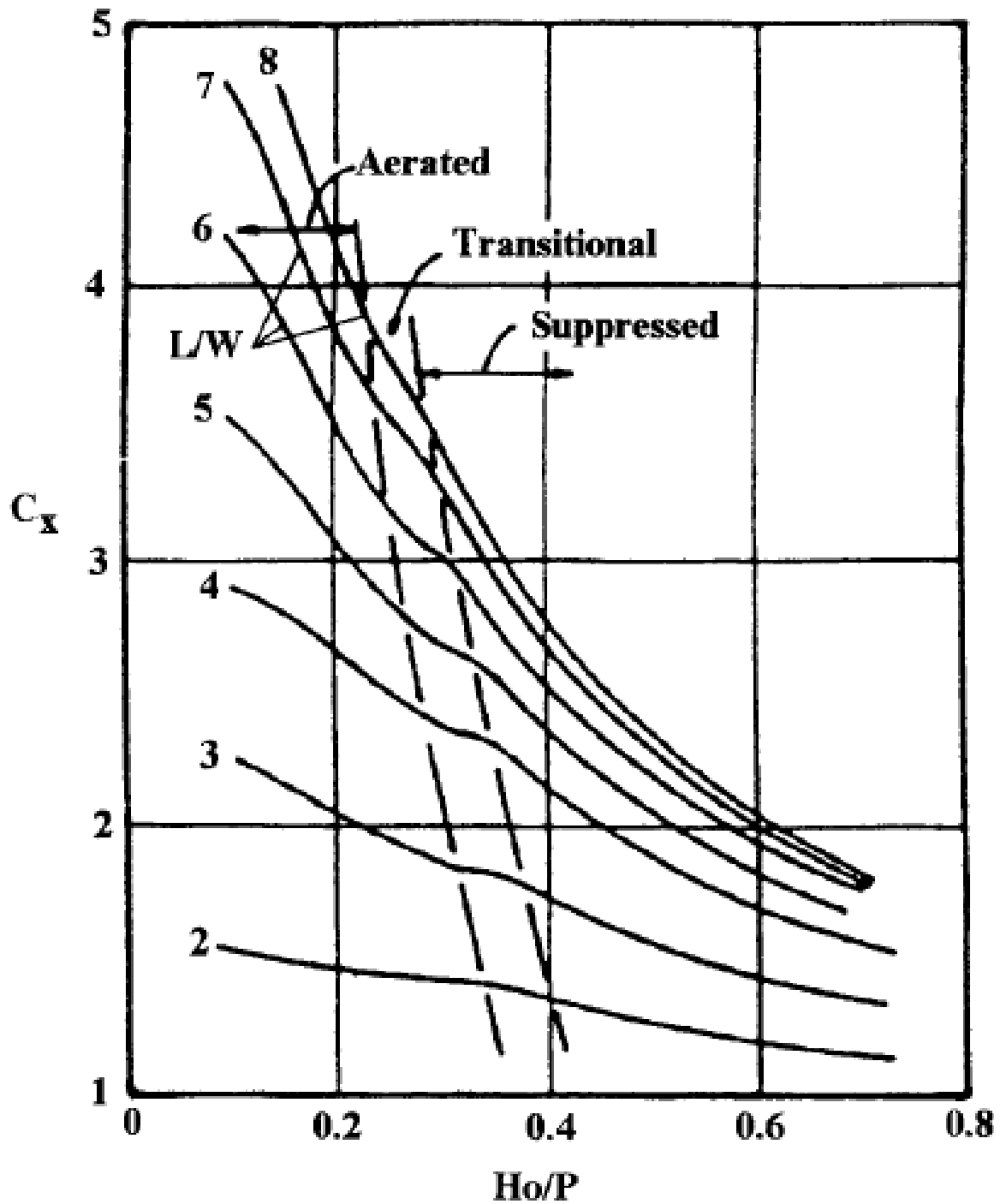


Figura 51 Curva de diseño para verteeero triangular de Lux y Hinchliff.

Fuente: Falvey (2003)

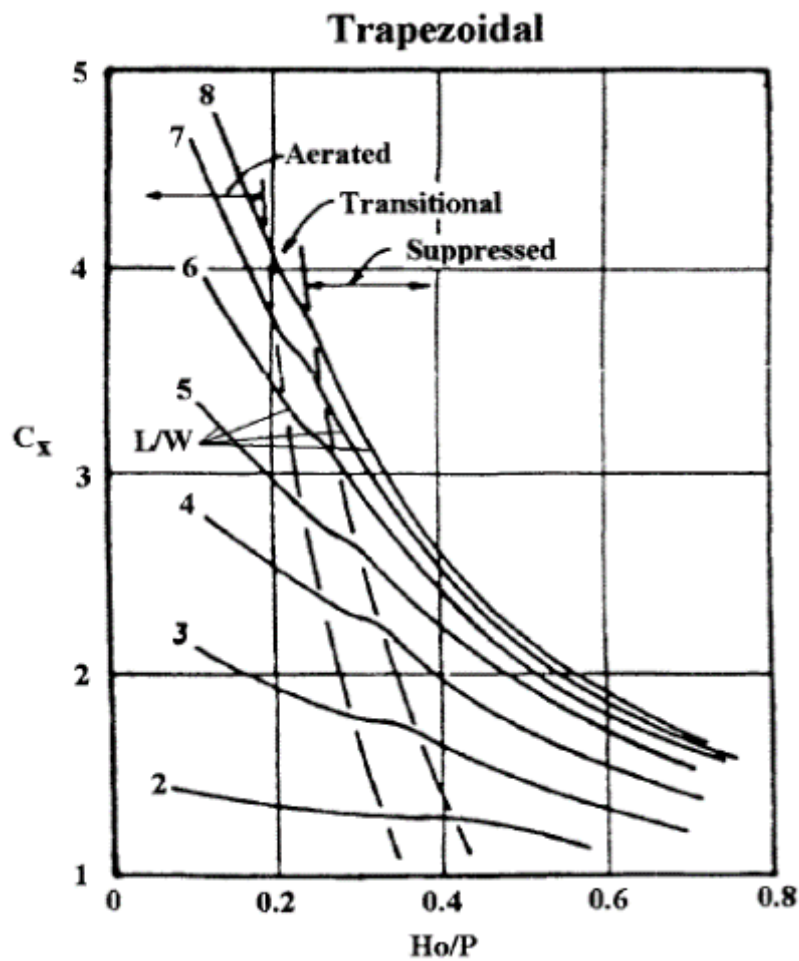


Figura 52 Curva de diseño para vertedero trapezoidal de Lux y Hinchliff.

Fuente: Falvey (2003)

Curvas de diseño de Tullis et al.

Tullis et al. (1995) definió que el caudal de descarga relacionando el coeficiente de descarga con la relación H_T/P . Además, utilizó la ecuación convencional de vertederos ($Q_L = C_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} H_T^{1.5}$) y tomó en cuenta la longitud efectiva del vertedero L_e , en lugar de tomar la longitud de la cresta completa, así como la carga total de aguas arriba H_T , y no la carga sobre la cresta del mismo vertedero.

$$Q_L = C_T \cdot L_e \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} H^{1.5}$$

Donde:

L_e : Longitud efectiva del vertedero, en metros

C_T : Coeficiente de descarga, adimensional

H : Carga total, en metros.

g : Aceleración de la gravedad, en m/s^2

Q : Caudal de descarga de vertedero, en m^3/s

Los coeficientes de cresta para un vertedero triangular con una cresta de cuarto de redondeo se muestran en la Figura como una función del ángulo que la presa hace con el flujo.

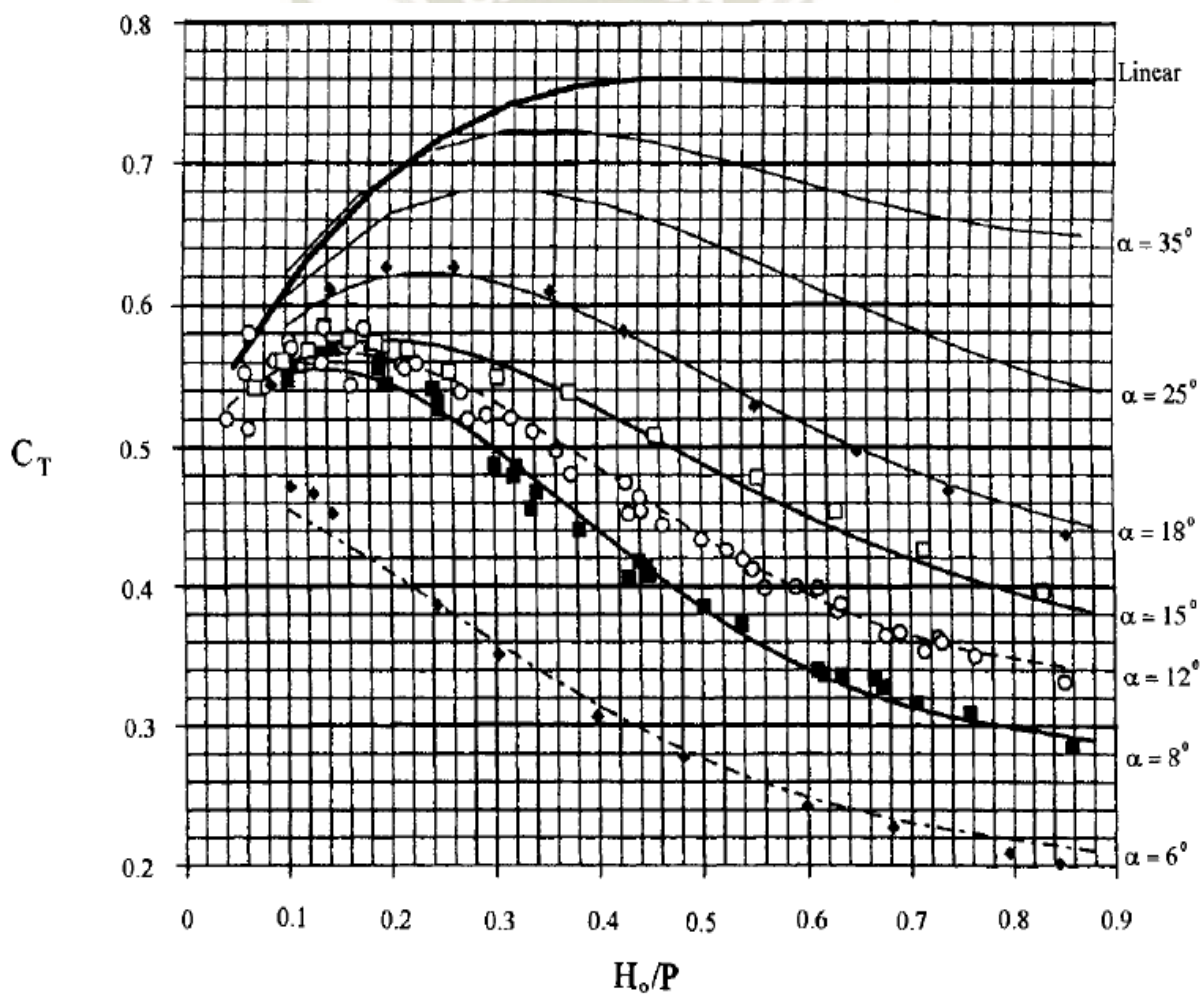


Figura 53 Curva de diseño para vertedero triangular con perfil de cresta de cuarto de redondeo.

Fuente: Falvey (2003)

Se pudo establecer también una forma de hablar el coeficiente de descarga con relacionar el ángulo de abertura, y la relación entre la altura de carga y la altura del paramento del vertedero, mediante la ecuación polinómica de cuarto grado siguiente:

$$C_d = A_1 + A_2 \left(\frac{H_T}{P}\right) + A_3 \left(\frac{H_T}{P}\right)^2 + A_4 \left(\frac{H_T}{P}\right)^3 + A_5 \left(\frac{H_T}{P}\right)^4$$

El resumen de los coeficientes para cada ángulo realizado por Tullis se encuentra resumido en la siguiente tabla.

Tabla 4 Coeficientes de la curva de diseño para vertederos de laberinto para vertedero triangular con perfil de cresta de cuarto de redondeo.

α	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
6	0.49	-0.24	-1.20	2.17	-1.03
8	0.49	1.08	-5.27	6.79	-2.83
12	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
15	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
18	0.49	1.32	-4.13	4.24	-1.50
25	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05
35	0.49	1.69	-4.05	3.62	-1.10
90	0.49	1.46	-2.56	1.44	0

Fuente: Falvey (2003)

2.7. Geometría de los vertederos en laberinto

El del término de “vertedero”, dentro de la ingeniería hidráulica, hace referencia a las estructuras de descarga cuya principal finalidad es el control de los niveles de agua en las obras hidráulicas como embalsamientos, cuando su capacidad de almacenamiento ordinario es superada por eventos no predecibles o extraordinarios de la naturaleza. Estas variaciones en los niveles de almacenamiento y su necesidad de descargas rápidas y efectivas se proyectan y construyen los

vertederos de laberinto, cuya peculiaridad es su forma similar a la de un “zig-zag”. Esta geometría cuya configuración es carácter especial fue aprovechada para el incremento de la longitud del vertedero, dentro de un espacio disponible, con la finalidad de aumentar la capacidad de descarga respecto a la de un vertedero convencional para una misma ubicación y carga hidráulica.

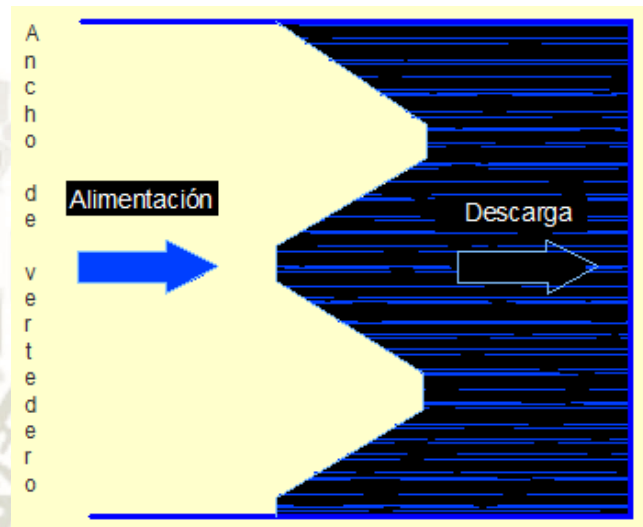


Figura 54 Vista en planta del vertedero en laberinto.

Fuente: Elaboración propia

Los estudios realizados a los vertederos en laberinto han establecido lo siguiente:

- Su estructura en cuanto al diseño geométrico permite proporcionar gran capacidad de descarga para sobreelevaciones
- Precisan de menos espacio para descargar grandes caudales
- Funcionan a descarga libre
- Es totalmente adaptable a cualquier tipo de geometría del canal de descarga,
- Presenta un comportamiento de vertedero de pared delgada



Figura 55 Vista de un vertederos en laberinto, Presa lake Brazos

Fuente: Hydraulic Design of Labyrinth Weirs, Henry T. Falvey, 2003

El coeficiente de descarga por su lado C_d también se encuentra sujeto a su geometría es decir al , al ancho de su ciclo W , al ángulo de pared lateral α , altura del vertedero P y a la orientación del ciclo.

Por otro lado el Caudal de descarga se encuentra en función de la longitud del vertedero L , la Carga de agua sobre el vertedero H_T , al ancho del canal que lo contiene W , la altura del vertedero P y la forma del vertedero que puede ser triangular, trapezoidal o rectangular. Las dimensiones principales se muestran en la siguiente figura.

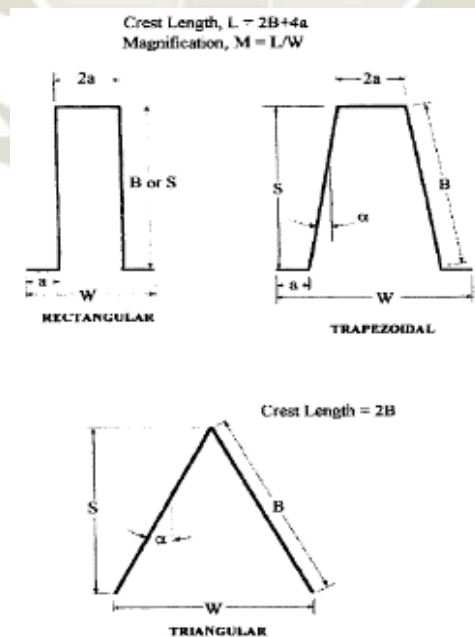


Figura 56 Geometría del vertedero en laberinto

Fuente: Hydraulic Design of Labyrinth Weirs, Henry T. Falvey, 2003

En un vertedero en laberinto el flujo aguas arriba esta influenciado por el angulo de abertura de las paredes laterales, y este se encuentra en función de $\frac{L}{W}$

$$\alpha_{max} = \arcsen(W/L)$$

El ángulo dado por esta relación es el valor máximo que se puede alcanzar para una presa laberíntica

Para una forma trapezoidal presentada de vista en planta la ecuación presenta la siguiente variación:

$$\alpha_{max} = \arcsen\left(\frac{W - 4a}{L - 4a}\right)$$

2.8. Diseño Hidráulico del vertedero en laberinto

2.8.1. Parámetros de diseño

El objetivo principal para realizar investigaciones que tengan que ver con la capacidad de descarga de aliviaderos es precisamente la importancia que tiene estos dentro de la obras de excedencias, para ello es importante realizar una estimación prudente en la configuración geométrica de los mismos, teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas por los diferentes autores con experiencia en modelamiento de vertederos en laberinto.

2.8.1.1. Pautas generales para la selección de parámetros

Diferentes relaciones se han establecido para poder describir y hallar de forma cuantitativa el flujo del vertedero en laberinto; es así que la vista en planta de la descripción geométrica se encuentra sujeta al ángulo de la pared lateral del vertedero, el número de ciclos y al factor de aumento o magnificación L/w , la recomendación de Tullis et al. 1985 nos dice que esta magnificación debe estar entre los 6° a 36° para su correcto funcionamiento como vertedero en laberinto.

Los siguientes parámetros son los que influyen de manera fundamental para el diseño del vertedero en laberinto:

- Magnificación de la longitud “ L/w ”
- Relación de Aspecto Vertical “ w/P ”
- Relación de la Carga y Altura del vertedero “ H_T/P ”
- Relación de aspecto horizontal “ W/P ”
- Número de Ciclos, “ n ”
- Ángulo de la pared Lateral, “ α ”
- Perfil de Cresta.
- Interferencia aguas abajo.
- Ahogamiento.

Para el diseño del vertedero en laberinto se tendrá a bien utilizar la siguiente nomenclatura para cada uno de los parámetros:

H_0 : Carga sobre la cresta del vertedero.

h_d : Profundidad del agua, aguas abajo del vertedero.

a : Mitad del ápice del vertedero, para vertederos trapezoidales.

b : Longitud de la pared lateral del vertedero.

W : Ancho del canal.

w : Ancho del ciclo del vertedero.

P : Altura del vertedero o paramento.

α_{max} : Ángulo para diseño en planta del vertedero en laberinto

Q_L/Q_N : Magnificación de flujo.

Q_L : Gasto en un vertedero en laberinto.

Q_N : Gasto en un vertedero Lineal.

ε : Eficiencia.

Descripción de los parámetros adimensionales:

Magnificación de la longitud “ L/w ”

Esta magnificación se refiere a la relación que hay entre la longitud de la pared lateral del vertedero por ciclo con el ancho del ciclo del vertedero, entonces según las tablas realizadas por Tullis, deducimos que para los vertederos en laberinto el ángulo máximo a utilizar se encuentra entre los valores de 6° y 36° .

Relación de Aspecto Vertical “ w/P ”

Esta relación es la que nos ayuda a definir el tamaño de los ciclos, debido a que si ésta relaciona el ancho del ciclo con la altura del paramento, afectando la descarga si es que “ w ” disminuye pues puede ocasionar interferencia en la lámina vertiente. Para efectos de funcionamiento hidráulico Lux (1989) sugiere utilizar un valor entre los 2.0 y 2.5 para los cálculos iniciales; mientras que Taylor (1968) recomienda que este valor sea mayor a 2.0

Relación de la Carga y Altura del vertedero “ H_T/P ”

Es la relación que existe entre la línea de altura de energía real y la altura del paramento del vertedero. A medida que la descarga del vertedero es mínima, pues la velocidad de carga es despreciable. Luz recomienda que esta relación debe estar en un rango de 0.45 a 0.5, sin embargo algunos otros investigadores realizaron sus pruebas con factores iguales a 1; es decir se puede establecer este factor también en el laboratorio. Tullis et al. 1996 realizó sus pruebas con un factor de relación de 0.9

Ángulo de la pared Lateral, “ α ”

Este ángulo es considerado por algunos autores que debe estar entre los valores de 6° a 36° . Este ángulo a medida que se incrementa, reduce la longitud del vertedero, reduciendo así también la concentración de flujo en la entrada del canal

Relación de aspecto horizontal “ W/P ”

Esta relación considera a al ancho del canal “ W ” y la altura del paramento “ P ” para los cuales Tullis y Lux recomiendan que se encuentren entre 2.0 y 3.0; sin embargo, otras investigaciones como las de Paxon y Savage (2006) redujeron estos valores a 1.5 y obtuvieron una descarga mayor de 19 % en la Presa Hyrum.

Número de Ciclos, “ n ”

Numero de porciones en las que el vertedero se va a ver dividido dependiendo del requerimiento de la investigación.

Perfil de Cresta

Se elige un perfil de cresta, el recomendable es el cuarto de redondeo pues es que que tiene mayor capacidad de descarga.

Ahogamiento

Cuando la capacidad de descarga es mayor a la esperada y la altura del agua, aguas abajo es mayor que la de la altura del paramento

Efectividad

Este parámetro fue propuesto por Hay y Taylos, donde nos da la eficiencia de los vertederos en laberinto segpun una comparación de relación de la descarga de un vertedero lineal con las mismas condiciones, además utiliza la magnificación del vertedero en función al ángulo de abertura del vertedero en laberinto.

$$\epsilon (\%) = \frac{\frac{Q_L}{Q_N}}{\frac{L}{W}} * 100$$

Consideraciones por algunos autores para el funcionamiento del vertedero en laberinto:

Tabla 5 Consideraciones por algunos autores para el funcionamiento del vertedero en laberinto

Relación	Autor	Observaciones
$1.23 \leq L/w \leq 4.35$ $1.15 \leq w/P \leq 4.61$ $5.70^\circ \leq \alpha \leq 20.60^\circ$ $0.05 \leq H_T/P \leq 0.25$	Kozák y Sváb (1961)	Generalmente utilizadas para formas trapezoidales. Limitadas a las pruebas de Taylor G.(1968, The performance of labyrinth weirs, university of nothingham. P 9)
$H_T/P \leq 0.7$ $w/P > 2.0$ Trapezoidal $w/P > 0.25$ Triangular $H/w < 0.35$	Taylor(1968)	Ninguno de los parámetros adecta a a la interferencia, parámetro que influye en la interferencia de longitud efectiva $.L_{de}/L_i$
$2.0 \leq w/P \leq 2.5$ $W/P < 2.0$	Lux (1989)	El vertedero es hidráulicamente eficiente

$H_T/P > 1^*$	Crookston (2010)	
---------------	------------------	--

*Las ecuaciones de tullis fueron corregidas por Crookston y son aplicables para valores de $H_T/P > 0.09$

2.9. Metodología.

La presente investigación ensayará modelos hidráulicos de vertederos en laberinto dentro de un canal hidrodinámico, para lo cual se realizaron una serie de acciones de forma tal que se diera en forma ordenada y con resultados coherentes.

Se comenzó con el traslado del canal hidrodinámico a las instalaciones del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Agustín, una vez que éste se encontraba en dichas instalaciones se procedió al armado del canal y a su habilitación, con todos los accesorios correspondientes, estos son: La poza de almacenamiento de agua que consta de una piscina de agua, en seguida las motobombas, en éste caso se contó con 3 de ellas, cuyos caudales máximos eran de 15 l/s, 30 l/s, 30 l/s., además de contar con las mangueras de alimentación al canal, mismo que cuenta con su propia poza de almacenamiento de agua que desemboca en el canal hidrodinámico de forma directa. El canal Hidrodinámico tiene 18 m. de longitud, un ancho de canal de 0.457m. y una altura de 0.50m.

Una vez habilitado el canal hidrodinámico se procedió a realizar la construcción de los vertederos en laberinto, estos se realizaron de material de acero de 0.3mm de espesor, de acuerdo a las especificaciones del diseño de los mismos. Para esto se utilizó disco de corte de 4.5 pulgadas, pulifán de 4.5 pulgadas, soldadura 6011, pintura benzenamel de colores blanco y anaranjado, Tinner y trapo industrial.

Para poder soldar las placas de acero, utilizamos el electrodo 70/18 para solo dar puntos en las láminas ya que, si se aplica la técnica del cordoneo, esto hace que se deforme la placa y se obtenga errores a la hora de la recolección de datos.

Las estructuras fueron habilitadas cuidadosamente para no incurrir en alteración de resultados al momento de realizar las pruebas hidráulicas, acondicionadas cada una a su característica, puesto que fueron divididas en 3 grupos de 3, correspondientes a su ángulo de abertura y al número de ciclos en este caso utilizamos los ángulos de 10°, 15° y 20 ° junto con 01, 02 y 03 ciclos para los diferentes casos.

Se contó dentro del canal Hidrodinámico con 05 sensores de presiones y un sensor de caudal Sontek IQ, los cuales fueron fundamentales para la toma exacta de los caudales y la carga hidráulica aguas arriba del vertedero además de las presiones en las diferentes partes de la estructura misma.

Las pruebas realizadas tomaron un promedio de 6 a 7 horas por cada una, esto incluye la habilitación del lugar en donde se va a instalar el vertedero, la instalación de equipos de presión y caudales, la propia recolección de datos, el desmontado y limpieza de las estructuras y la

colocación del siguiente vertedero. Los caudales empleados en cada prueba iniciaron desde los 7 l/s hasta un máximo de 58 l/s

2.10. Diseño Geométrico definitivo.

Según las ecuaciones del diseño de autores ya experimentados en vertederos en laberinto, es que se tomaron las recomendaciones de las relaciones adimensionales, tomando el parámetro de magnificación de la longitud, de acuerdo al ángulo máximo de abertura, la relación de aspecto vertical, de forma tal que se puedan realizar 9 diferentes estructuras con diferentes parámetros de diseño geométrico.

2.10.1. Modelo Piloto de 3 ciclos y 10 Grados de abertura.

De acuerdo a las especificaciones y necesidades planteadas para el diseño del vertedero, establecidos en el punto 2.8 del capítulo III es que se obtuvo como resultado la forma geométrica para el modelo piloto a partir del cual también se desarrollaron los demás vertederos.

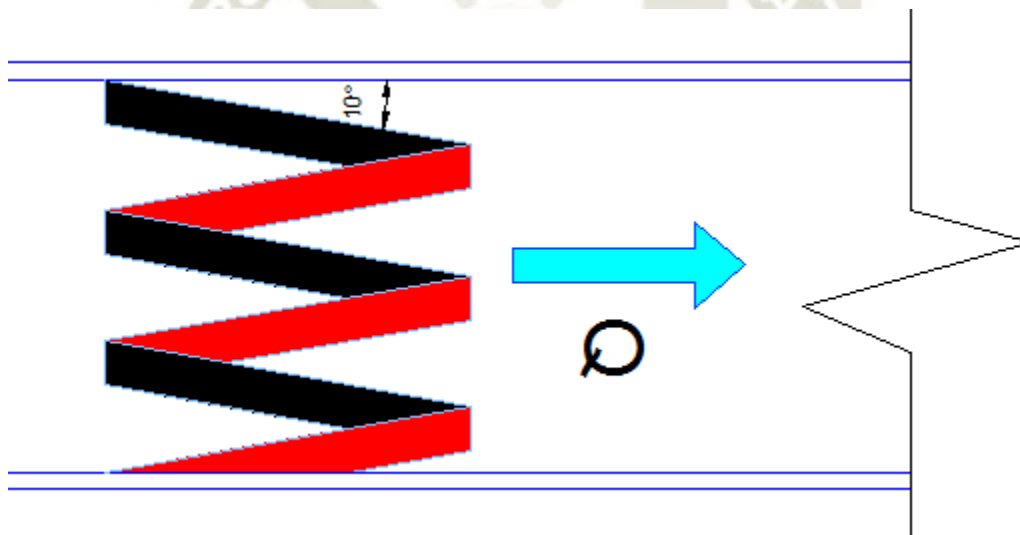


Figura 57 Geometría del modelo piloto

Fuente: Elaboración propia

Es así que el modelo piloto se realizó en material de triplay, a medida exacta al canal hidrodinámico, para poder plantear un plan a seguir y generar ideas en cuanto a la construcción del modelo físico en material de acero, esto a razón de poder elegir el material, la técnica para juntar las piezas, la pintura y los acabados necesarios.

Tabla 6 Parámetros para el diseño del modelo piloto de 03 ciclos -10 grados de abertura

Ancho del Ciclo (W)	
	W
Anho del canal	Wc
Nro de ciclos	n
Longitud del vertedero L	
método gráfico	
Magnificación	m
Longitud del vertedero	L
Ancho del cada ciclo	W
Long cada lado	B
Profundidad del Vertedero S	
Profundidad del Vertedero	S
Altura de vertedero *supuesto	
segun la necesidad	P
relacion de aspecto	w/P
$2 \leq W/P \leq 2.5$	
valores propuestos por Lux 1989	
vertedero eficientemente hidráulico	

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos anteriores es que se realizaron los cálculos necesarios para poder diseñar y construir los siguientes modelos junto a las consideraciones finales del propio diseño ya en material de planchas de acero de 3mm de espesor.

2.11. Construcción e instalación

Para poder realizar la investigación el proceso se dividió en dos fases, la primera fase engloba toda la descripción de las estructuras que hay en el laboratorio y sus características, por otro lado, la segunda fase, describe el procedimiento para poder construir los vertederos en laberinto, sus acabados finales y su instalación.



Fotografía 1. Instalación de Vertederos en canal hidrodinámico

2.11.1. Descripción del Canal hidrodinámico

2.11.1.1. Estructuras del canal

2.11.1.1.1. Pozo de disipación

Esta estructura comprende dos módulos de diferentes medidas, el primer módulo es de 1.83 m. x 3 m. x 1.10 m. y el segundo módulo es de 9.41 m. x 3 m. x 1.10 m. ambos unidos comprenden el pozo de disipación, el material del que se encuentran hechos es de ángulos de metal y acrílico además de planchas de metal para las bases y muros. Esta poza de disipación a su vez se encuentra antes del propio canal.



Fotografía 2. Pozo de disipación

Esta misma poza de disipación cuenta con puntos de entrada de agua para el acopio de agua y puntos de salida para el desfogue de agua para poder realizar la limpieza y el cambio permanente de agua pues es necesario bajar el nivel del agua de la poza de disipación para poder cambiar los vertederos a ensayar.



Fotografía 3. Tuberías de salida de agua



Fotografía 4. Tuberías de alimentación a la poza de disipación

2.11.1.1.2. Canal hidrodinámico

El canal para realizar la investigación consta módulos de 1.2 m cada uno, en este caso, tiene una longitud de 18 m y desemboca en una piscina de almacenamiento de alimentación a la poza de disipación, consta de una sección transversal de 0.457 m. y una altura de 0.523 m.



Fotografía 5. Vista del Canal hidrodinámico hasta la piscina de almacenamiento

Además, el canal mismo se encuentra sostenida por una estructura de metal regulables en altura para poder nivelar en canal a estas estructuras se le llaman caballetes.



Fotografía 6. Soporte de Canal hidrodinámico "Caballetes"

2.11.1.1.3. Canal aguas abajo

El Canal aguas abajo cuenta con un desnivel de 0.50 m. para colocar estructuras de caída, este llega a la desembocadura de la piscina de alimentación, consta con una sección transversal de 0.457 m. y una longitud de 6 m. esta parte del canal además se encuentra dividida en dos tramos, uno que queda inmediatamente después del desnivel y tiene una longitud de 3 m. y una altura de 1.23m y el segundo tramo tiene 3 m. y una altura de 0.50 m. Todo este canal aguas abajo se encuentra soportado por estructuras estacionarias distribuidas a lo largo del canal modular.



Fotografía 7. Canal Hidrodinámico aguas debajo del vertedero

2.11.1.2. Equipos anexos al Canal

2.11.1.2.1. Motobombas de agua

Las Motobombas utilizadas para realizar la investigación están consideradas dentro del equipo mecánico presente, el número de motobombas utilizadas fueron un total de 3, dos de ellas fueron de 15 HP y una de 7 HP. En la presente investigación se trabajó con un caudal mínimo de 7 L/s, y por otro lado al trabajar con las 3 bombas en simultáneo, y con el selector de caudal en su aceleración máxima, se llegó a obtener un caudal máximo de 60 L/s.



Fotografía 8. Motobomba de 7 HP y 15 HP

2.11.1.2.2. Sistema de Succión y alimentación

Las bombas además cuentan con un sistema de tuberías de succión de 3 y 4 pulgadas de diámetro fijadas mediante un a abrazadera metálica, este diámetro va dependiendo de la motobomba, y un sistema de impulsión de agua, que está conformada por un sistema de mangas de plástico, que se conectan al final a tuberías en la poza de disipación, y son las encargadas de alimentar de agua el canal hidrodinámico.



Fotografía 9. Tuberías y mangueras de alimentación

2.11.1.2.3. Piscina de alimentación y almacenamiento

Esta estructura es la encargada de recibir y almacenar el agua, en primera instancia esta piscina , debe ser llenada hasta el límite para poder así llenar la poza de disipación del canal, cuando se llena la poza de disipación , la piscina debe ser nuevamente llenada para poder contar con un volumen de circulación de agua dentro del canal, es así que constantemente esta piscina dota de agua al canal y a su vez se vuelve a llenar con el agua recibida del mismo, asegurando de esa forma la circulación ininterrumpida y el correcto funcionamiento del mismo.



Fotografía 10. Piscina de almacenamiento y punto de alimentación

2.11.1.3. Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos SCADA

Para llevar a cabo la adquisición de datos y su correcto funcionamiento, se llevó a cabo a calibración, programación y configuración de equipos externos dedicados a la recopilación de datos mediante impulsos eléctricos.

2.11.1.3.1. Datalogger

Este instrumento es el encargado del registro de todos los impulsos eléctricos y de su almacenamiento, además muestra en tiempo real todas las variaciones de los mismos, tiene la ventaja de agruparlos por grupos siendo así su interfaz amigable y entendible por el investigador.



Fotografía 11. Datalogger

2.11.1.3.2. Periféricos

Los sensores periféricos fueron utilizados para captar las variaciones de presión en el vertedero, los datos proporcionados fueron analizados en el trabajo de gabinete, estos sensores son aquellos que se encuentran en constante comunicación con el Datalogger, proporcionando exactitud y confiabilidad en todo su registro.



Fotografía 12. Sensores de presión

2.11.2. Construcción, instalación y habilitación de los vertederos en laberinto

A continuación, se procederá a detallar mediante ilustraciones y descripción, cual fue el proceso de construcción, habilitación e instalación de los vertederos en laberinto.



Fotografía 13. Modelos finalizados listos para la prueba hidráulica

2.11.1.3. Modelos de vertederos en Laberinto

- a) Corte de Planchas metálicas de 3mm de espesor.



Fotografía 14. Corte de planchas metálicas a medida para vertederos

- b) Pulido de esquinas y limpieza de planchas en general.



Fotografía 15. Pulido de planchas metálicas

c) Trazo de estructura y soldadura de planchas metálicas 3 mm de espesor.



Fotografía 16. Trazo y soldadura de plancha metálica para vertederos

d) Soldadura de paredes de vertedero.



Fotografía 17. Soldadura de paredes del vertedero

e) Acabados de perfil de cresta



Fotografía 18. Pulido de perfil de cresta

f) Pintado y acabados finales



*Fotografía 19. Pintado de
vertedero*



*Fotografía 20. Acabado final de
vertedero a ensayar*

2.11.1.4. Habilitación del vertedero en el canal hidrodinámico.

a) Limpieza del canal



Fotografía 21. Limpieza y habilitación el tercer módulo del canal

- b) Habilitación de perforaciones para las mangueras depresión en vertederos



Fotografía 22. Perforaciones en vertederos para mangueras de presión

- c) Instalación de vertederos en canal hidrodinámico



Fotografía 23. Habilitación de vertedero en canal hidrodinámico

2.11.1.5. Materiales Utilizados.

Se requirieron una serie de materiales para poder habilitar el vertedero en el canal y que este pudiera trabajar en óptimas condiciones a favor de no incurrir en errores en las lecturas de los sensores ni en las mediciones realizadas a mano.

- a) Wincha, corrector y esponja cuadrada cinta teflón, cinta de embalaje y cinta masking tape.



Fotografía 24. Wincha, corrector y esponja cuadrada cinta teflón, cinta de embalaje y cinta masking tape

b) Silicona transparente Sikasil IA y su aplicador



Fotografía 25. Silicona transparente Sikasil IA y su aplicador

c) Cúter, Combo, punzón de granito, cincel de metal



Fotografía 26. Cúter, Combo, punzón de granito, cincel de metal

d) Pipeta de agua



Fotografía 27. Pipeta de agua

d) Taladro



Fotografía 28. Taladro

3. Modelamiento de vertederos en laberinto

3.1. Medicion de variables físicas.

En esta investigación dividiremos la medida de las variables en tres grupos para cada modelo de vertedero (nueve modelos en total). Dentro del primer grupo, vamos a encontrar datos relacionados a los registrados por el caudalímetro Son Tek IQ. Los datos que se va a tomar como prioridad para la investigación serán los datos del caudal, los tirantes y la velocidad media, registrados aguas arriba de los vertederos.



Fotografía 29. Caudalímetro Son Tek IQ, Display de datos, y alimentador de energía

El segundo grupo serán los datos relacionados a la medición de tirantes máximos y mínimos, velocidades y caudales. Todos estos datos, serán obtenidos mediante técnicas manuales aguas abajo del vertedero en laberinto. Para las mediciones de tiempos y velocidades se contó con material de precisión numérica y digital. Y, por último, el tercer grupo estará relacionado a los sensores periféricos (apartado 2.11.1.3.2), quienes registrarán las presiones dentro del vertedero.

Tabla 7 Rangos de entrada y salida en sensores de presión

Input	-100 a 100 mbar
Output	4 a 20 mA

Fuente: Elaboración propia

3.3. Obtención, proceso y calculo de datos

Los datos obtenidos por los equipos de precisión se tomaron partir de la instalación y habilitación de los vertederos dentro del canal hidrodinámico. Estos datos fueron tomados de manera progresiva y ascendente iniciando con caudales mínimos que varían desde los 6 L/s hasta los 8 L/s, y llegando a obtener como caudales máximos 55 L/s hasta 60 L/s. Cabe resaltar que, primero, se habilita el vertedero 12 horas antes de realizar las pruebas, para que la silicona pueda fraguar bien y no haya desperfectos ni variaciones en la estabilidad del vertedero. Luego de las 12 horas, se comienzan las pruebas y la recopilación de datos, que duran aproximadamente entre 5 a 6 horas. Luego hay que descargar la información, y seguidamente desinstalar el vertedero, hacer limpieza en el canal e instalar el siguiente vertedero a ensayar. Es requerido esperar a las horas de fragua de la silicona.

3.3.1. Vertederos en Laberinto.

3.3.1.1. Modelo 1: Angulo de 10°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m.

En el modelo 1 (vertedero en laberinto de 10 grados de abertura, 01 ciclo y P = 0.185 m.) se presenta la tabla 8 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 58 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de

agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 30 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 41 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 8. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclos, P= 0.185m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad 1(V)	Tirante (m) de caudalímetro	Ho(m)	Fr	Re
0.007	0.07	0.209	0.014	0.0495	7453
0.009	0.1	0.211	0.016	0.0703	10731
0.013	0.11	0.213	0.018	0.0770	11834
0.015	0.15	0.218	0.022	0.1038	16341
0.019	0.19	0.221	0.026	0.1303	20850
0.024	0.24	0.225	0.0295	0.1634	26589
0.028	0.27	0.231	0.035	0.1813	30328
0.033	0.31	0.237	0.04	0.2055	35286
0.037	0.34	0.24	0.043	0.2239	38951
0.041	0.37	0.242	0.045	0.2423	42656
0.046	0.41	0.245	0.047	0.2670	47464
0.049	0.43	0.247	0.05	0.2779	50085
0.055	0.48	0.247	0.054	0.3082	56357

Fuente: Elaboración propia

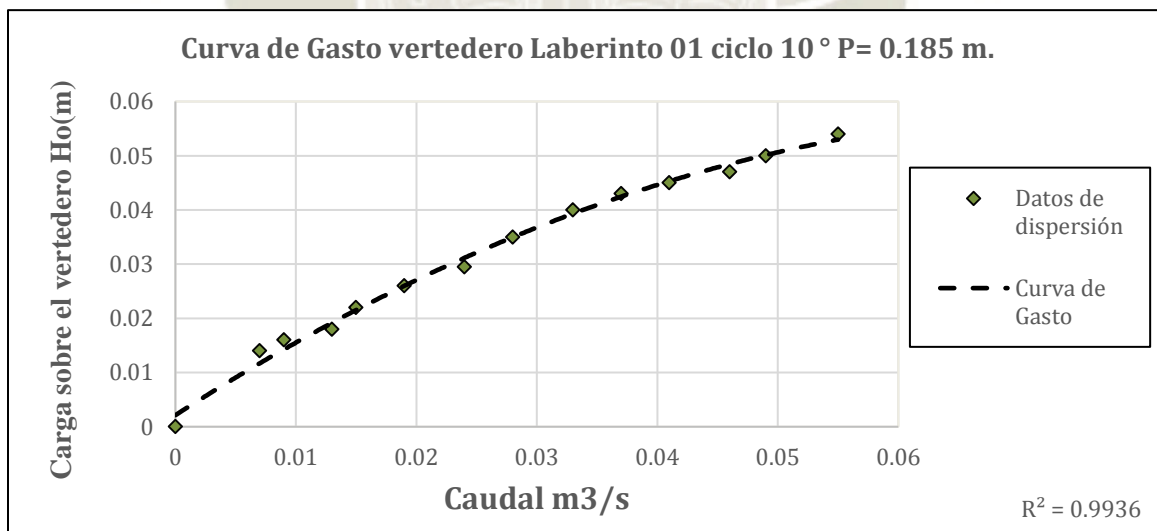


Figura 58. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10°, 01 ciclos, P= 0.185m)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 30. Vertedero en laberinto de 01 ciclo, 10° , $P = 0.185\text{m}$. en funcionamiento $Q = 41\text{ L/s}$

3.3.1.2. Modelo 2: Angulo de 10° , Nro. de ciclos = 02, $P = 0.11\text{ m}$.

En el modelo 2 (vertedero en laberinto de 10° de abertura, 02 ciclos y $P = 0.11\text{ m}$.) se presenta la tabla 9 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 59 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 31 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 16 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 9. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10° , 02 ciclos, $P = 0.11\text{m}$

Caudal(Q) (m^3/s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	$H_o(\text{m})$	Fr	Re
0.007	0.14	0.132	0.011	0.125	11233
0.01	0.17	0.134	0.013	0.152	13693
0.013	0.21	0.139	0.018	0.182	17615
0.016	0.24	0.144	0.023	0.204	20598
0.018	0.28	0.145	0.024	0.238	24245
0.02	0.3	0.147	0.025	0.254	25977
0.022	0.32	0.151	0.028	0.267	28070

0.024	0.35	0.152	0.03	0.290	30962
0.026	0.38	0.155	0.033	0.313	34034
0.028	0.4	0.155	0.0335	0.328	35970
0.03	0.42	0.156	0.034	0.344	37769
0.032	0.44	0.16	0.039	0.355	40353
0.034	0.45	0.164	0.042	0.358	41898
0.038	0.47	0.165	0.05	0.367	44561

Fuente: Elaboración propia

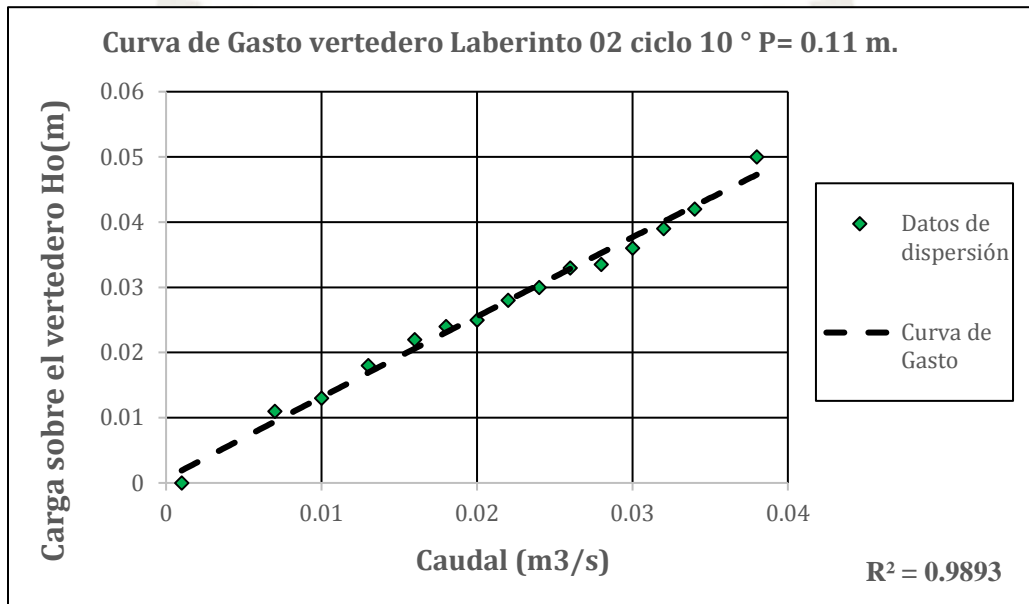
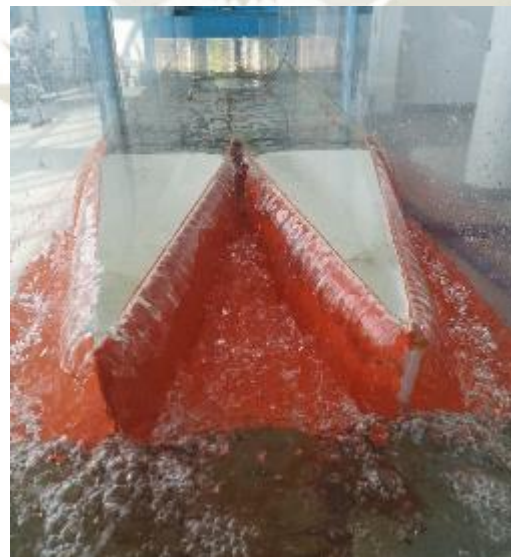


Figura 59. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10° , 02 ciclos, $P= 0.11m$)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 31. Vertedero en laberinto de 02 ciclos, 10° , $P= 0.11m$. en funcionamiento $Q= 16 L/s$

3.3.1.3. Modelo 3: Angulo de 10°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m.

En el modelo 3 (vertedero en laberinto de 10 grados de abertura, 03 ciclos y P = 0.075 m.) se presenta la tabla 10 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 60 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 32 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 14 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 10. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.006	0.14	0.098	0.011	0.147	8977
0.008	0.18	0.099	0.0125	0.187	11815
0.01	0.23	0.101	0.014	0.236	15326
0.012	0.26	0.101	0.0155	0.265	17454
0.014	0.29	0.103	0.017	0.294	19751
0.016	0.31	0.105	0.019	0.309	21413
0.018	0.36	0.11	0.022	0.353	25551
0.02	0.38	0.113	0.026	0.366	27674
0.022	0.41	0.117	0.03	0.388	30601
0.024	0.44	0.117	0.033	0.410	33426
0.026	0.46	0.121	0.036	0.424	35546
0.029	0.49	0.124	0.038	0.446	38494
0.031	0.51	0.13	0.044	0.455	41342

Fuente: Elaboración propia

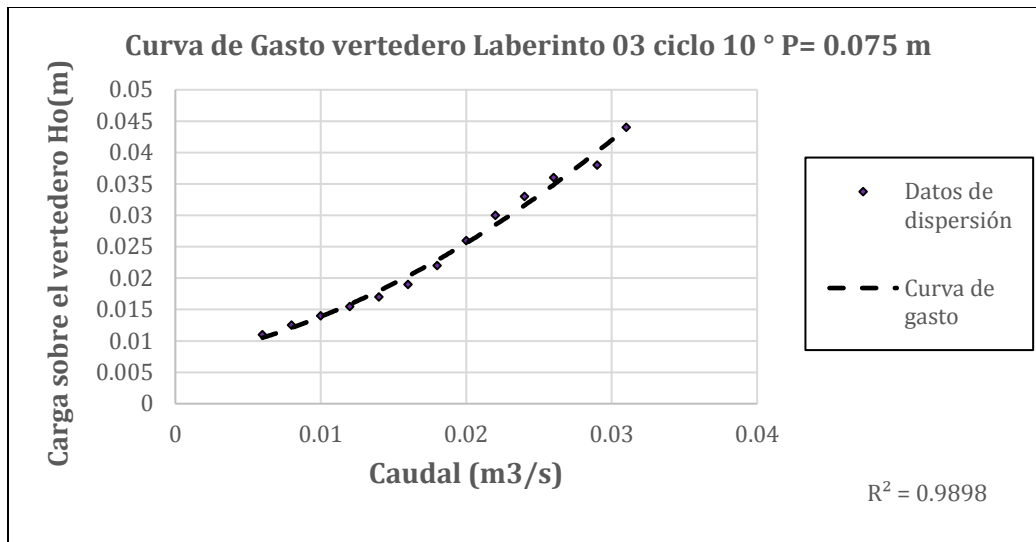
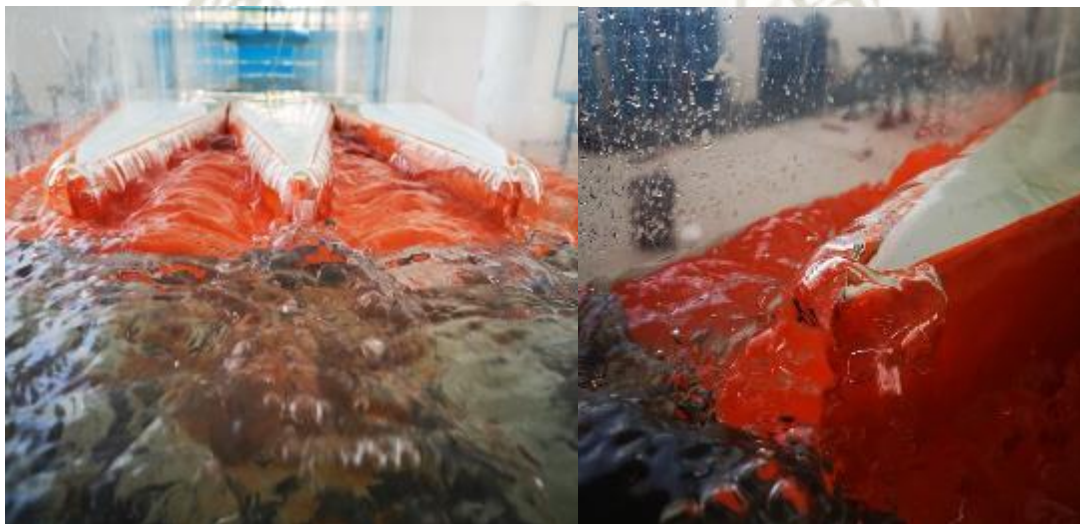


Figura 60. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (10°, 03 ciclos, P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 32. Vertedero en laberinto de 03 ciclos, 10°, P= 0.075m. en funcionamiento Q= 14 L/s

3.3.1.4. Modelo 4: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m.

En el modelo 4 (vertedero en laberinto de 15 grados de abertura, 01 ciclo y P = 0.185 m.) se presenta la tabla 11 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 61 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 33 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 14 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 11. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclos, P= 0.185m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.006	0.060	0.210	0.013	0.0423097	6421.730
0.010	0.100	0.214	0.016	0.0698938	10785.466
0.012	0.120	0.218	0.020	0.0832106	13040.303
0.014	0.140	0.221	0.023	0.0962503	15363.327
0.019	0.180	0.227	0.028	0.122248	19988.505
0.022	0.210	0.232	0.033	0.1412447	23588.779
0.025	0.230	0.235	0.037	0.1531191	26066.255
0.028	0.270	0.240	0.042	0.1779523	30931.766
0.033	0.300	0.245	0.046	0.1957876	34729.881
0.039	0.340	0.250	0.051	0.2196105	39761.268
0.045	0.390	0.254	0.054	0.250037	45879.664
0.051	0.430	0.258	0.059	0.2734851	50978.054
0.055	0.460	0.258	0.063	0.2895178	55050.120
0.060	0.490	0.268	0.067	0.3056405	59178.179
0.064	0.520	0.271	0.070	0.3219052	63249.598

Fuente: Elaboración propia

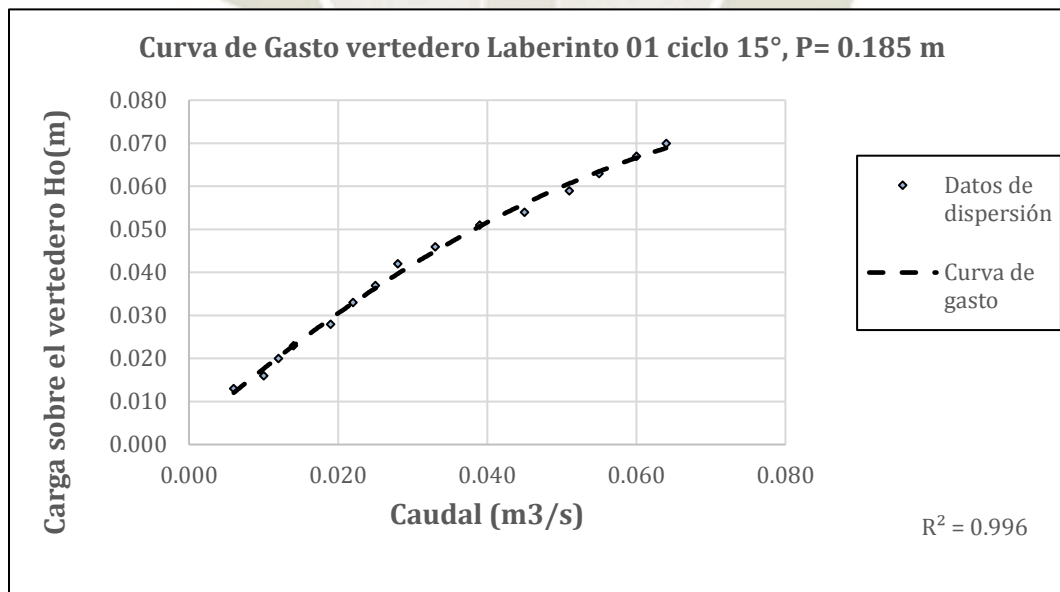


Figura 61. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 01 ciclos, P= 0.185m)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 33. Vista frontal y lateral de vertedero en laberinto de 01 ciclo, 15°, $P= 0.185\text{m}$ en funcionamiento.
 $Q= 14\text{ L/s}$

3.3.1.5. Modelo 5: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 02, $P = 0.11\text{ m}$.

En el modelo 5 (vertedero en laberinto de 15 grados de abertura, 02 ciclos y $P = 0.11\text{ m}$.) se presentará la tabla 12 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 62 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 34 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 15 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 12. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, $P= 0.11\text{m}$

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.007	0.120	0.136	0.014	0.1063	9825.432
0.009	0.150	0.136	0.016	0.1317	12402.819
0.013	0.190	0.144	0.022	0.1637	16086.135
0.015	0.220	0.180	0.027	0.1855	19132.845
0.018	0.260	0.152	0.031	0.2151	23096.037
0.020	0.280	0.155	0.033	0.2299	25179.096
0.022	0.310	0.158	0.038	0.2517	28210.794
0.024	0.330	0.160	0.039	0.2663	30148.101
0.026	0.350	0.163	0.041	0.2771	32827.907
0.028	0.360	0.166	0.045	0.2815	34252.986

0.030	0.380	0.170	0.046	0.2954	36409.131
0.032	0.410	0.171	0.050	0.3172	39553.978
0.034	0.430	0.174	0.052	0.3291	41903.579
0.036	0.440	0.176	0.055	0.3365	43019.956
0.038	0.460	0.180	0.056	0.3433	46135.925
0.040	0.470	0.191	0.064	0.3473	47714.547
0.044	0.500	0.197	0.067	0.3615	51950.110
0.046	0.510	0.000	0.076	0.0000	0.000

Fuente: Elaboración propia

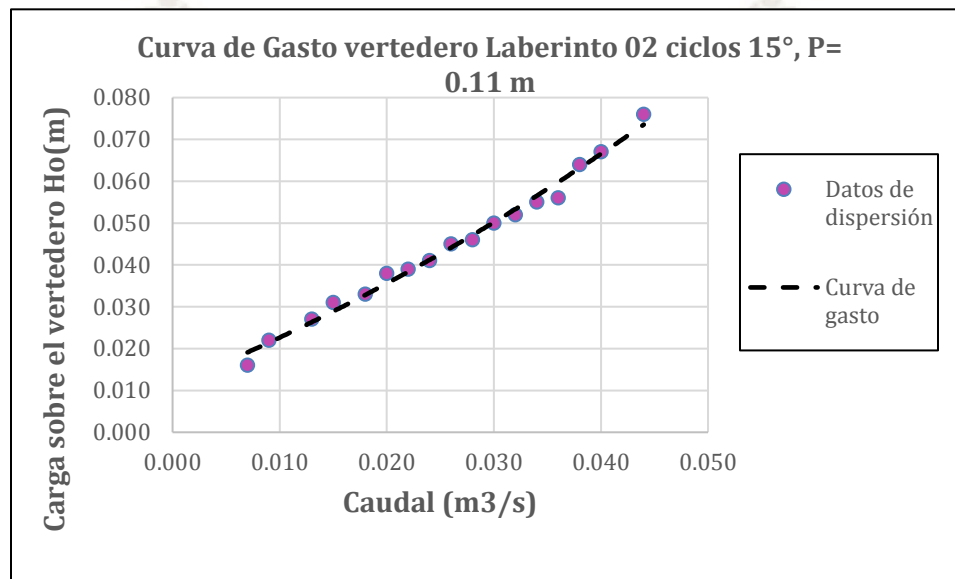


Figura 62. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 02 ciclos, P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 34. Vista frontal y lateral (condición de "cavidad" de napa vertiente sobre la cresta del vertedero) del vertedero en laberinto de 02 ciclos, 15° P= 0.11m, en funcionamiento $Q= 15 \text{ L/s}$

3.3.1.6. Modelo 6: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m.

En el modelo 6 (vertedero en laberinto de 15 grados de abertura, 03 ciclos y P = 0.075 m.) se presenta la tabla 13 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 63 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 35 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 12 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 13. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.007	0.160	0.098	0.014	0.1669	10421.651
0.010	0.210	0.101	0.016	0.2160	13993.468
0.012	0.260	0.103	0.018	0.2652	17453.664
0.014	0.280	0.105	0.019	0.2822	19070.306
0.016	0.320	0.109	0.023	0.3163	22561.107
0.018	0.340	0.117	0.026	0.3319	24290.089
0.020	0.360	0.119	0.032	0.3404	27030.058
0.022	0.390	0.126	0.037	0.3610	29968.096
0.025	0.450	0.127	0.041	0.4102	35159.906
0.028	0.460	0.134	0.047	0.4073	37477.016

Fuente: Elaboración propia

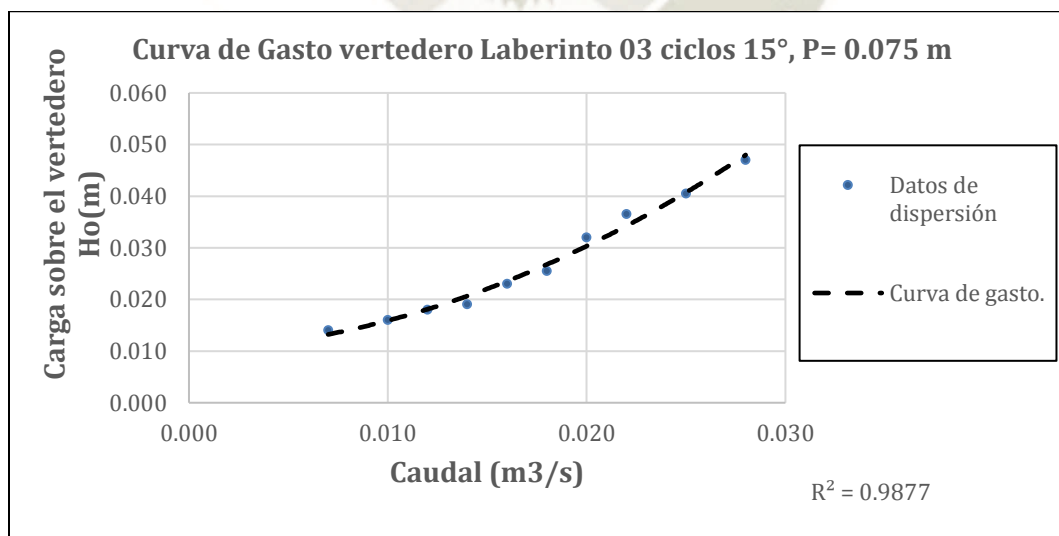


Figura 63. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (15°, 03 ciclos, P= 0.075m)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 35. Vertedero en laberinto de 03 ciclos, 15°, P= 0.075m. en funcionamiento. Q= 12 L/s

3.3.1.7. Modelo 7: Angulo de 20°, Nro. de ciclos = 01, P = 0.185 m.

En el modelo 7 (vertedero en laberinto de 20 grados de abertura, 01 ciclos y P = 0.185 m.) se presenta la tabla 8 con los datos obtenidos por el caudalímetro “Son Tek IQ”. En la figura 64 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 36 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 17 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 14. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0	0	0	0	0	0
0.007	0.080	0.215	0.019	0.0558	8650.193
0.010	0.100	0.217	0.022	0.0691	10893.823
0.012	0.120	0.221	0.026	0.0824	13168.566
0.017	0.160	0.234	0.039	0.1066	18133.047
0.020	0.180	0.238	0.042	0.1191	20533.156
0.024	0.220	0.242	0.047	0.1443	25363.297
0.027	0.240	0.245	0.050	0.1563	27783.905
0.030	0.260	0.250	0.055	0.1677	30466.186
0.033	0.290	0.253	0.058	0.1858	34115.648

0.036	0.310	0.255	0.059	0.1974	36681.273
0.040	0.340	0.257	0.063	0.2154	40461.576
0.044	0.360	0.262	0.067	0.2261	43162.383
0.048	0.400	0.262	0.070	0.2495	48308.717
0.052	0.420	0.273	0.076	0.2585	51353.923

Fuente: Elaboración propia

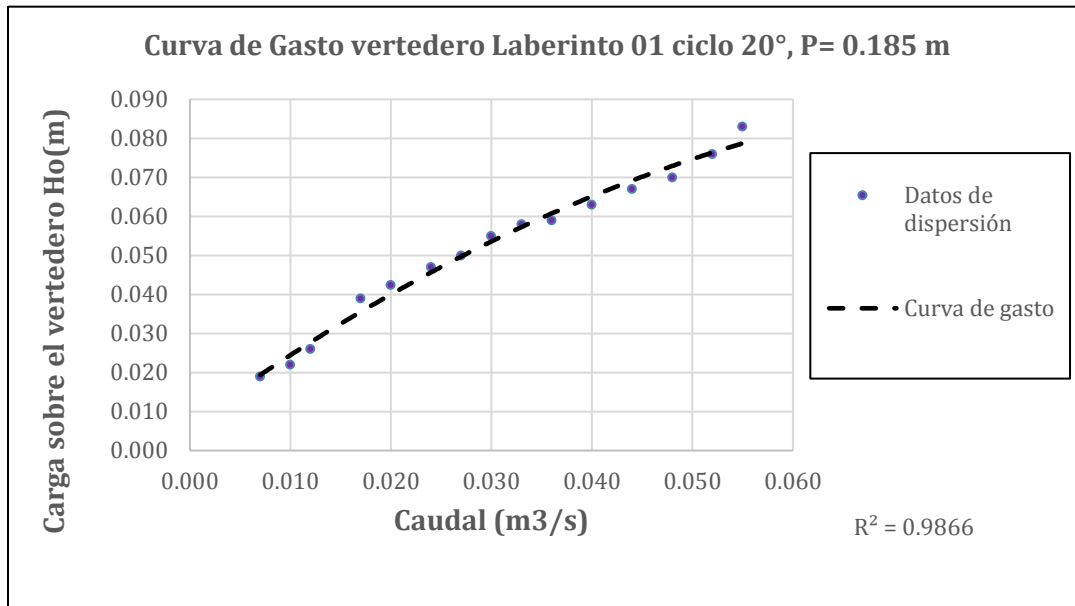


Figura 64. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 01 ciclo, P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 36. Vertedero en laberinto de 01 ciclo, 20°, P= 0.185m. en funcionamiento; muestra de salto hidráulico aguas abajo $Q= 17 \text{ L/s}$

3.3.1.8. Modelo 8: Angulo de 20°, Nro. de ciclos = 02, P = 0.11 m.

En el modelo 8 (vertedero en laberinto de 20 grados de abertura, 02 ciclos y P = 0.11 m.) se presenta la tabla 12 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 62 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 37 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 15 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 15. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclo, P= 0.11m

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.007	0.110	0.139	0.020	0.0961	9226.696
0.009	0.130	0.143	0.022	0.1115	11056.897
0.011	0.170	0.145	0.024	0.1447	14590.263
0.013	0.190	0.147	0.026	0.1604	16523.820
0.015	0.230	0.150	0.028	0.1922	20175.336
0.017	0.240	0.152	0.031	0.1987	21230.930
0.019	0.270	0.157	0.034	0.2211	24279.843
0.021	0.290	0.159	0.036	0.2352	26390.743
0.023	0.310	0.161	0.038	0.2498	28430.517
0.025	0.330	0.166	0.041	0.2623	30725.297
0.027	0.350	0.169	0.045	0.2762	32947.218
0.029	0.370	0.174	0.050	0.2865	35328.040
0.031	0.390	0.176	0.052	0.2968	37752.171
0.033	0.400	0.182	0.058	0.2996	39618.601
0.035	0.410	0.188	0.063	0.3038	41247.613
0.037	0.430	0.191	0.065	0.3161	43523.024
0.040	0.450	0.194	0.069	0.3234	46224.750
0.044	0.470	0.205	0.082	0.3331	49777.578
0.048	0.490	0.121	0.087	0.0000	52307.992

Fuente: Elaboración propia

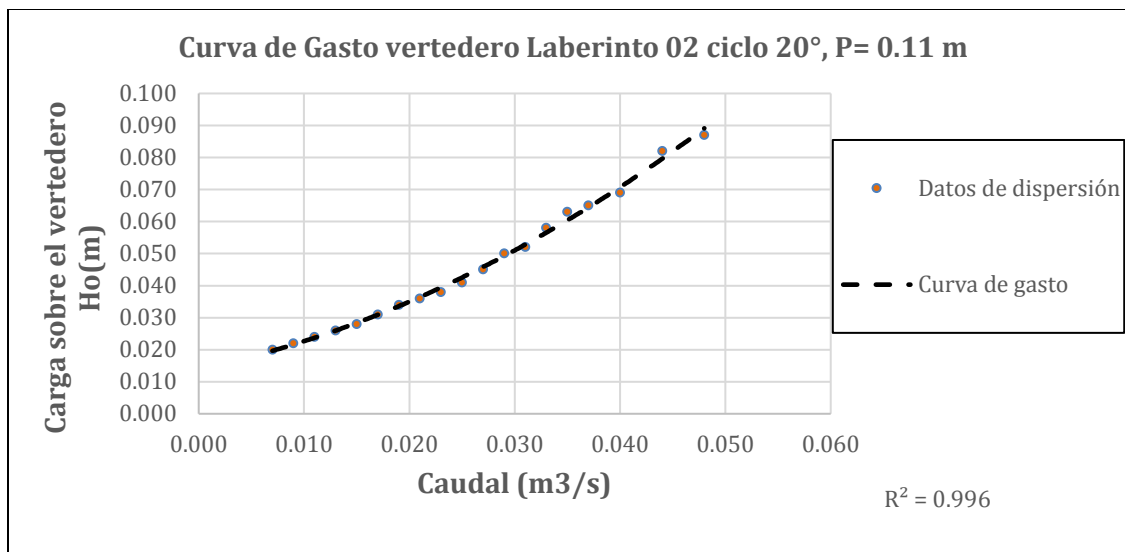


Figura 65. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 02 ciclo, P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 37. Vertedero en laberinto de 02 ciclos 20°, P= 0.11m. en funcionamiento Q= 15 L/s

3.3.1.1. Modelo 9: Angulo de 15°, Nro. de ciclos = 03, P = 0.075 m.

En el modelo 9 (vertedero en laberinto de 15 grados de abertura, 03 ciclos y P = 0.075 m.) se presenta la tabla 16 con los datos obtenidos por el caudalímetro Son Tek IQ. En la figura 66 se puede observar la relación que existe entre el caudal captado por el sensor So Tek IQ y la carga de agua por encima del vertedero, aguas arriba del mismo. La fotografía 38 ilustra al vertedero en funcionamiento, con un caudal de 14 L/s aguas arriba del vertedero.

Tabla 16. Parámetros de entrada aguas arriba del vertedero en laberinto 20°, 03 ciclo, $P= 0.075m$

Caudal(Q) (m ³ /s)	Velocidad(V) (m/s)	Tirante de caudalímetro (m)	Ho(m)	Fr	Re
0.006	0.140	0.102	0.016	0.1428	9466.850
0.008	0.200	0.105	0.019	0.2026	13621.647
0.010	0.210	0.107	0.022	0.2099	14505.766
0.012	0.250	0.108	0.024	0.2475	17507.553
0.014	0.270	0.112	0.027	0.2623	19414.680
0.016	0.290	0.118	0.032	0.2742	21644.903
0.018	0.320	0.124	0.037	0.2964	24589.207
0.020	0.340	0.128	0.041	0.3099	26709.997
0.023	0.380	0.131	0.043	0.3418	30332.129
0.025	0.390	0.142	0.057	0.3316	33471.779

Fuente: Elaboración propia

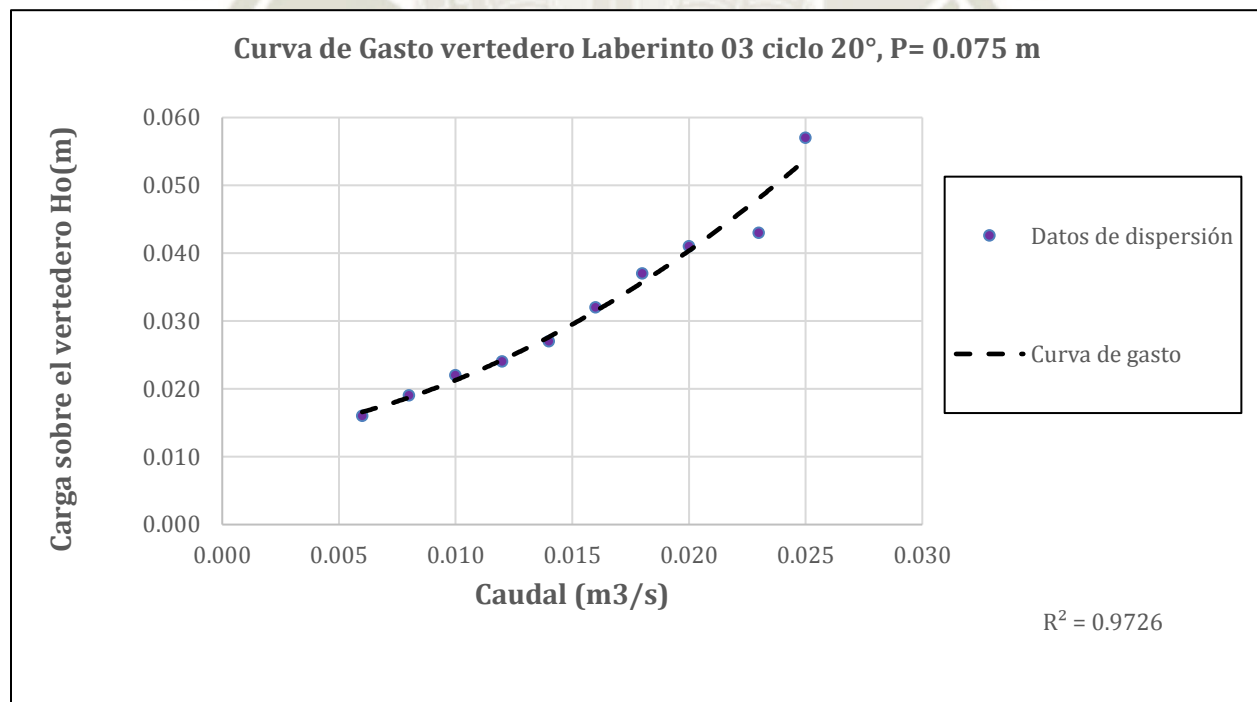


Figura 66. Relación del Gasto hidráulico y la Carga de agua sobre el vertedero (20°, 03 ciclo, $P= 0.075m$)

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 38. Vertedero en laberinto de 03 ciclos 20° , $P= 0.075m$. en funcionamiento $Q= 14 L/s$

Los datos obtenidos del sistema aguas abajo se mostrados a continuación teniendo en cuenta que el mismo no contiene compuertas ni estructuras anexas. Para obtener estos datos, se utilizaron métodos manuales de medición cuyos resultados se expresan en las siguientes tablas.

- H_o : Carga de agua sobre el vertedero.
- V_s : Velocidad de Salida.
- T_1 : Tirante de agua tomado a 50 cm. aguas abajo del vertedero.
- T_2 : Tirante de agua tomado a 100 cm. aguas abajo del vertedero.
- T_3 : Tirante de agua tomado a 150 cm. aguas abajo del vertedero.
- T_{prom} : Tirante promedio aguas debajo de T_1 , T_2 , T_3 .
- Q Práctico: Caudal tomado con el Caudalímetro Son Tek.
- Frs : Numero de Froude aguas abajo del vertedero.
- Res : Numero de Reynolds aguas abajo del vertedero.
- Q teórico: Caudal calculado con la fórmula de Tullis, Amaniam y Waldron corregido (2004).
- P.E: Pérdida de energía aguas abajo del vertedero.

Para poder hallar el Caudal teórico se utilizó una tabla de iteraciones propuestas por Tullis Amaniam y Waldron en 1995.

Tabla 17. Coeficientes de la curva de diseño para vertederos en laberinto, perfil tipo Cuarto de redondeo.

ángulo	A1	A2	A3	A4	A5
6°	0.49	-0.24	-1.20	2.17	-1.03
8°	0.65	1.08	-5.27	6.79	-2.83
12°	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
15°	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
18°	0.49	1.32	-4.13	4.24	-1.50
25°	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05
35°	0.49	1.69	-4.05	3.62	-1.10
90°	0.49	1.46	-2.56	1.44	0.00

Fuente: Tullis, Amaniam y Waldron 1995.

Par para poder hallar el coeficiente de descarga para vertederos en laberinto, se utilizó la siguiente

$$\text{fórmula: } C_d = A_1 + A_2 \left(\frac{H_o}{P}\right) + A_3 \left(\frac{H_o}{P}\right)^2 + A_4 \left(\frac{H_o}{P}\right)^3 + A_5 \left(\frac{H_o}{P}\right)^4$$

Sin embargo, estos valores se modificaron en el 2003 por Crookston para el ángulo de 8 grados.

Tabla 18. Coeficientes polinomiales, Tullis modificado

ángulo	A1	A2	A3	A4	A5
6°	0.49	-0.24	-1.20	2.17	-1.03
8°	0.65	-0.35	-2.03	4.22	-2.37
12°	0.49	1.06	-4.43	5.18	-1.97
15°	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
18°	0.49	1.32	-4.13	4.24	-1.50
25°	0.49	1.51	-3.83	3.40	-1.05
35°	0.49	1.69	-4.05	3.62	-1.10
90°	0.49	1.46	-2.56	1.44	0.00

Para ello se hallaron los valores apropiados para la presente investigación.

Tabla 19. Valores hallados para los ángulos de 10°, 15° y 20°

ángulo	A1	A2	A3	A4	A5
10°	0.490	0.355	-3.230	4.700	-2.170
15°	0.49	1.00	-3.57	3.82	-1.38
20°	0.49	1.37	-4.04	4.00	-1.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m

Ho(m)	Velocidad de salida(Vs)	T1	T2	T3	T Prom.	Q Práctico	Fr salida(Frs)	Re Salida(Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0140	0.287	0.043	0.048	0.050	0.047	0.006	0.422	5933.27	0.0064	-3.39%	0.562
0.0160	0.317	0.056	0.054	0.052	0.054	0.008	0.436	7124.90	0.0078	0.94%	0.597
0.0180	0.362	0.063	0.060	0.058	0.060	0.010	0.471	8395.58	0.0092	7.55%	0.597
0.0220	0.424	0.074	0.071	0.068	0.071	0.014	0.508	10466.54	0.0124	9.98%	0.611
0.0260	0.485	0.082	0.078	0.076	0.079	0.017	0.553	12137.25	0.0157	9.94%	0.731
0.0295	0.538	0.091	0.087	0.084	0.087	0.021	0.581	13906.53	0.0188	12.59%	0.564
0.0350	0.578	0.103	0.100	0.098	0.100	0.027	0.583	16316.72	0.0237	10.74%	0.251
0.0400	0.625	0.118	0.112	0.110	0.113	0.032	0.593	18831.76	0.0282	13.00%	0.235
0.0430	0.667	0.124	0.121	0.119	0.121	0.037	0.611	20504.15	0.0309	16.53%	0.224
0.0450	0.714	0.130	0.127	0.125	0.127	0.042	0.639	21890.61	0.0326	21.48%	No aplica
0.0470	0.746	0.138	0.130	0.127	0.132	0.045	0.657	22873.16	0.0344	23.39%	No aplica
0.0500	0.775	0.141	0.134	0.132	0.136	0.048	0.672	23776.01	0.0370	22.98%	No aplica
0.0540	0.800	0.157	0.154	0.142	0.151	0.055	0.657	26651.36	0.0404	26.78%	No aplica

Fuente: Elaboración propia

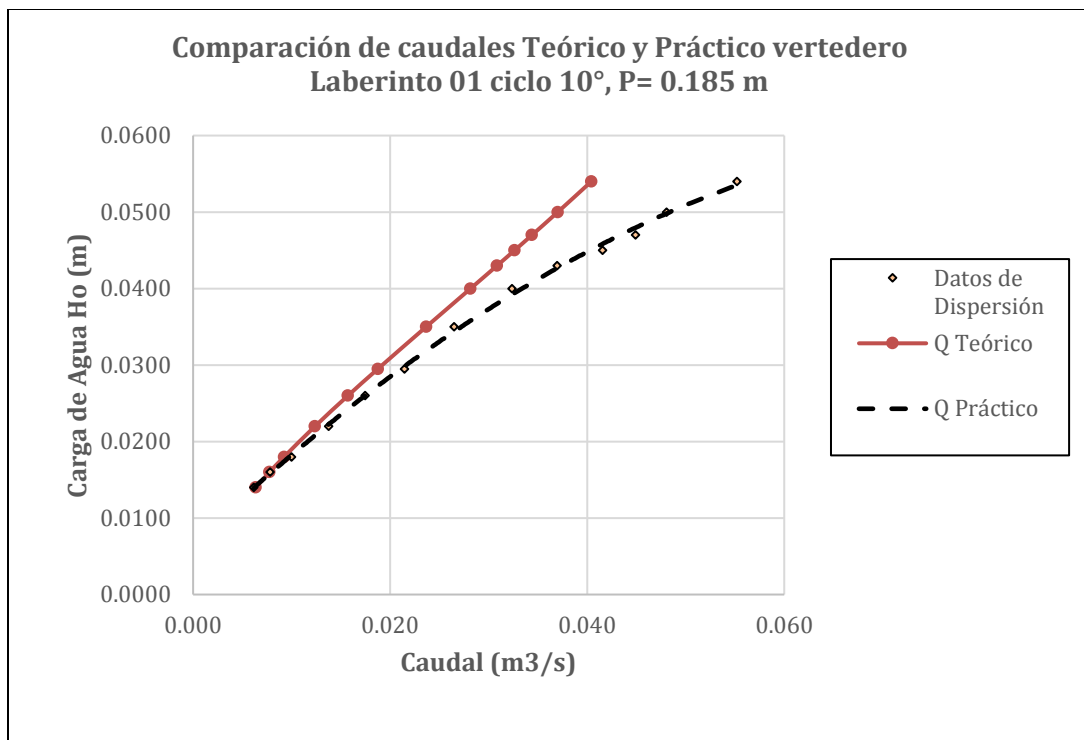


Figura 67. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m
Fuente: Elaboración Propia.

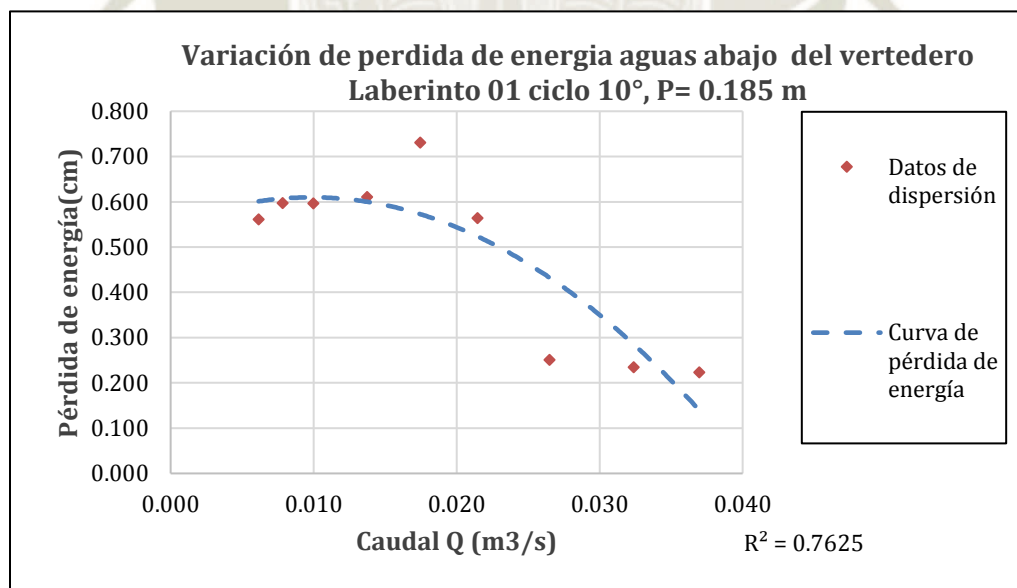


Figura 68. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185m
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 02 ciclo, P= 0.11m

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom.	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0110	0.339	0.050	0.049	0.048	0.049	0.008	0.489	6641.68	0.0044	41.58%	0.166
0.0130	0.361	0.056	0.053	0.052	0.054	0.009	0.498	7457.44	0.0056	35.66%	0.163
0.0180	0.450	0.071	0.069	0.067	0.069	0.014	0.548	10387.59	0.0089	34.98%	0.167
0.0220	0.556	0.078	0.077	0.076	0.077	0.020	0.639	12380.21	0.0124	36.69%	0.174
0.0240	0.571	0.083	0.081	0.078	0.081	0.021	0.642	13075.60	0.0131	33.42%	0.173
0.0250	0.581	0.086	0.084	0.082	0.084	0.022	0.640	13682.92	0.0138	33.39%	0.065
0.0280	0.592	0.095	0.094	0.083	0.091	0.025	0.627	14841.90	0.0158	28.86%	0.050
0.0300	0.595	0.100	0.095	0.089	0.095	0.026	0.618	15522.28	0.0172	25.46%	0.038
0.0330	0.606	0.106	0.103	0.096	0.102	0.028	0.607	16725.57	0.0191	22.23%	0.031
0.0335	0.621	0.107	0.103	0.097	0.102	0.029	0.620	16958.98	0.0194	23.11%	0.000
0.0360	0.637	0.108	0.103	0.098	0.103	0.030	0.634	17201.09	0.0197	18.09%	0.000
0.0390	0.676	0.115	0.113	0.108	0.112	0.035	0.645	18991.54	0.0228	21.17%	0.000
0.0420	0.735	0.121	0.118	0.112	0.117	0.039	0.686	20254.40	0.0245	23.80%	0.000

Fuente: Elaboración propia

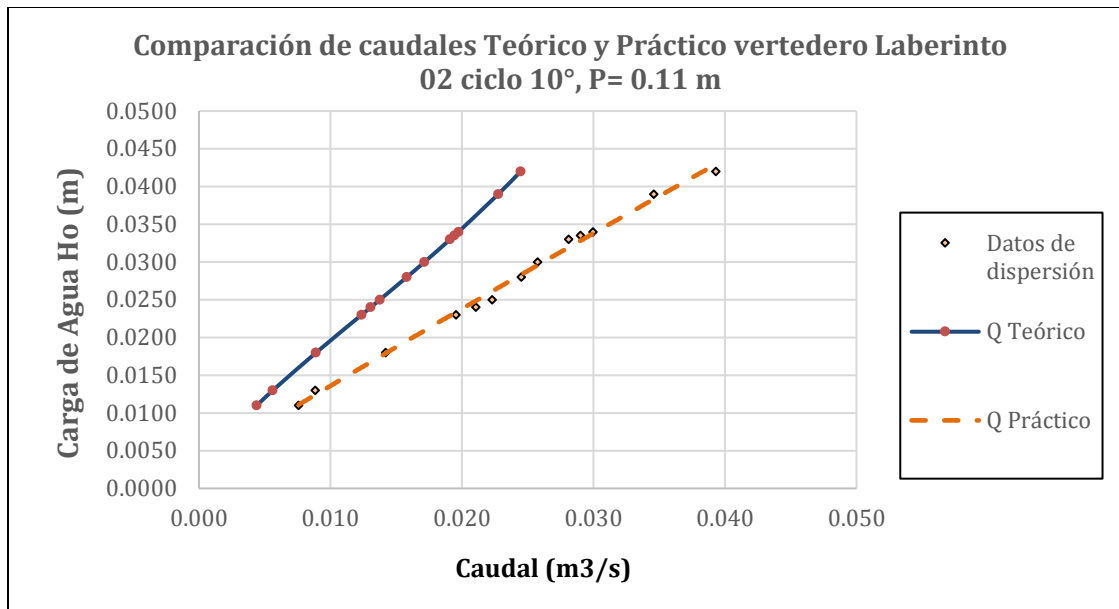


Figura 69. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11m

Fuente: Elaboración propia

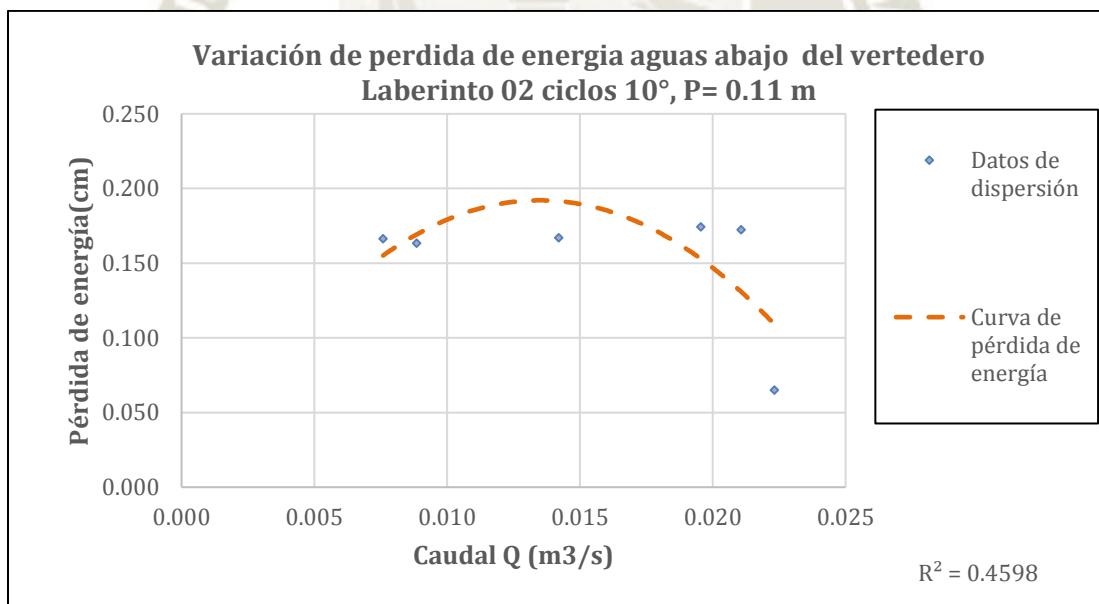


Figura 70. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Promedio	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía(cm)
0.0110	0.339	0.050	0.049	0.048	0.049	0.008	0.489	6641.68	0.0044	41.93%	0.166
0.0130	0.361	0.056	0.053	0.052	0.054	0.009	0.498	7457.44	0.0056	36.48%	0.163
0.0180	0.450	0.071	0.069	0.067	0.069	0.014	0.548	10387.59	0.0089	37.26%	0.167
0.0230	0.556	0.078	0.077	0.076	0.077	0.020	0.639	12380.21	0.0124	36.73%	0.174
0.0240	0.571	0.083	0.081	0.078	0.081	0.021	0.642	13075.60	0.0131	37.99%	0.173
0.0250	0.581	0.086	0.084	0.082	0.084	0.022	0.640	13682.92	0.0138	38.37%	0.065
0.0280	0.592	0.095	0.094	0.083	0.091	0.025	0.627	14841.90	0.0158	35.52%	0.050
0.0300	0.595	0.100	0.095	0.089	0.095	0.026	0.618	15522.28	0.0172	33.40%	0.038
0.0330	0.606	0.106	0.103	0.096	0.102	0.028	0.607	16725.57	0.0191	32.04%	0.031
0.0335	0.621	0.107	0.103	0.097	0.102	0.029	0.620	16958.98	0.0194	33.06%	0.000
0.0340	0.637	0.108	0.103	0.098	0.103	0.030	0.634	17201.09	0.0197	34.16%	0.000
0.0390	0.676	0.115	0.113	0.108	0.112	0.035	0.645	18991.54	0.0228	34.17%	0.000
0.0420	0.735	0.121	0.118	0.112	0.117	0.039	0.686	20254.40	0.0245	37.78%	0.000
0.0500	0.833	0.135	0.128	0.120	0.128	0.049	0.745	22735.09	0.0286	41.25%	0.000

Fuente: Elaboración propia

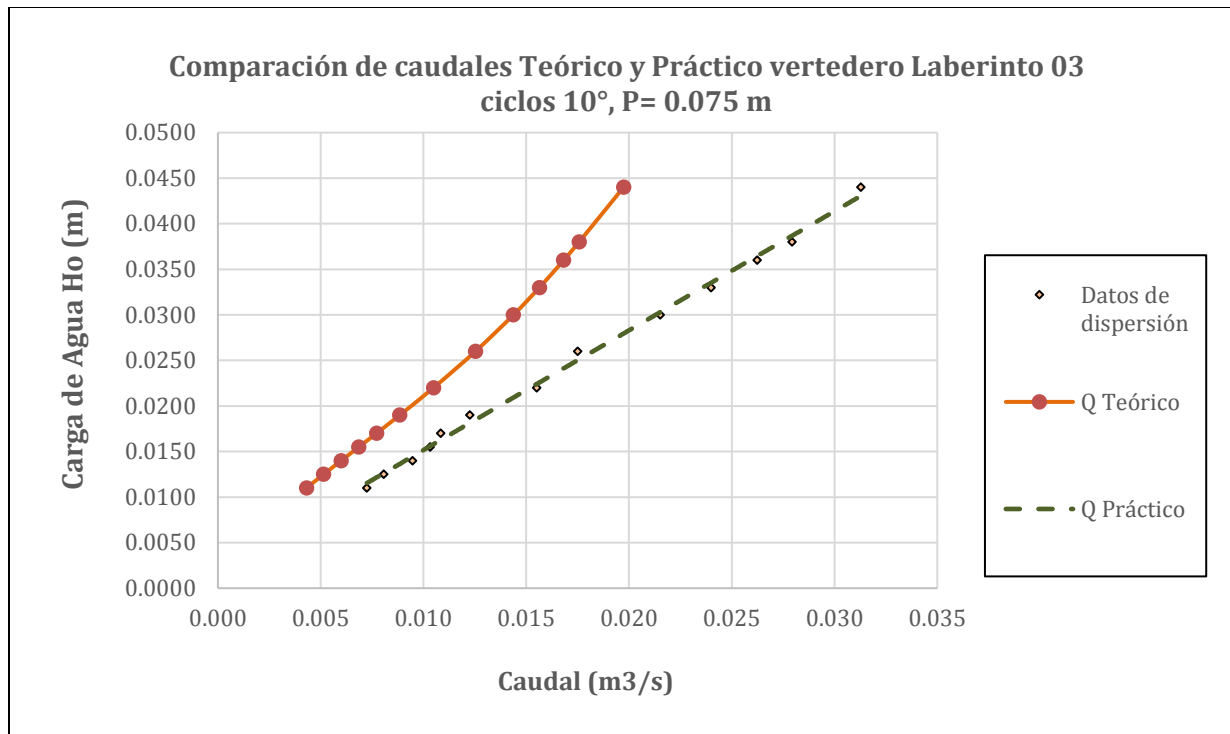


Figura 71. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m

Fuente: Elaboración propia

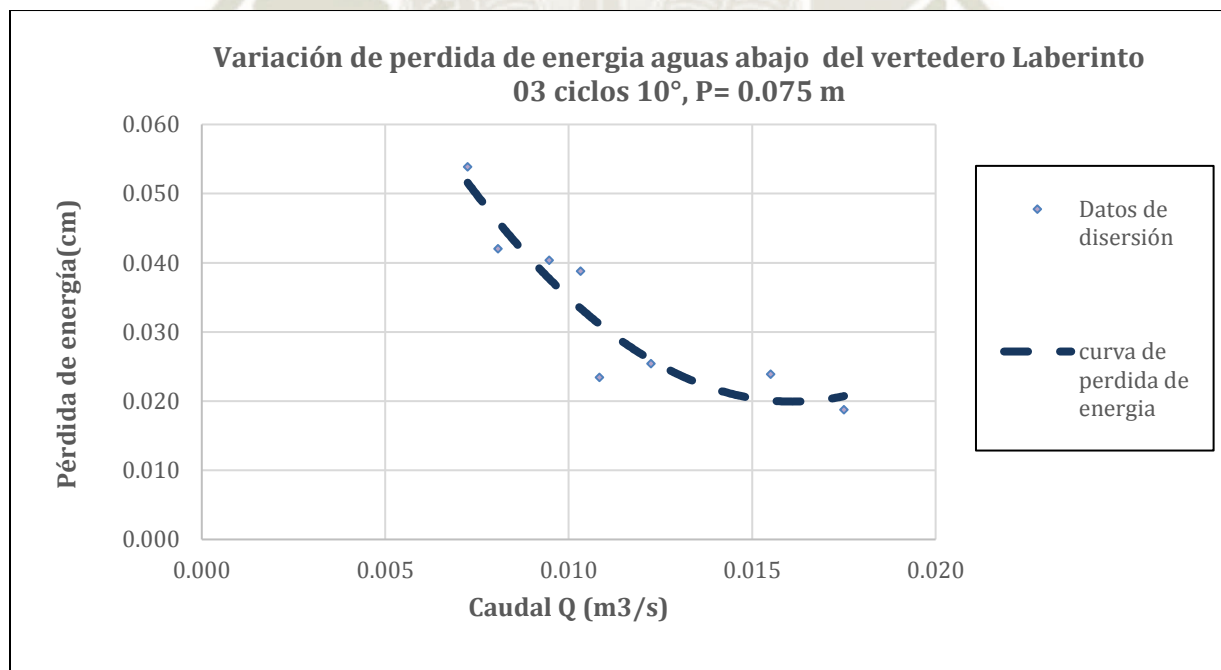


Figura 72. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom.	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0130	0.336	0.050	0.048	0.047	0.048	0.007	0.487	6524.60	0.0042	43.47%	1.239
0.0160	0.375	0.058	0.056	0.054	0.056	0.010	0.505	7892.11	0.0058	39.41%	0.608
0.0200	0.442	0.056	0.063	0.061	0.060	0.012	0.577	8978.24	0.0082	32.03%	0.548
0.0230	0.463	0.072	0.068	0.066	0.069	0.014	0.565	10406.98	0.0103	29.18%	0.648
0.0280	0.515	0.083	0.078	0.076	0.079	0.019	0.586	12420.25	0.0139	25.14%	0.762
0.0330	0.565	0.090	0.087	0.084	0.087	0.022	0.612	14056.31	0.0179	20.24%	0.731
0.0370	0.581	0.098	0.093	0.090	0.094	0.025	0.607	15257.54	0.0213	14.46%	0.532
0.0420	0.592	0.105	0.103	0.099	0.102	0.028	0.591	16751.70	0.0257	7.20%	0.426
0.0460	0.610	0.114	0.110	0.106	0.110	0.031	0.587	18156.36	0.0293	4.42%	0.473
0.0510	0.625	0.126	0.120	0.115	0.120	0.034	0.575	19994.90	0.0339	1.35%	0.665
0.0540	0.704	0.131	0.126	0.120	0.126	0.040	0.634	21529.54	0.0367	9.26%	0.194
0.0590	0.806	0.145	0.140	0.135	0.140	0.052	0.688	24753.87	0.0414	19.82%	0.000
0.0630	0.877	0.156	0.145	0.140	0.147	0.059	0.730	26462.73	0.0451	23.46%	0.000
0.0670	0.909	0.160	0.155	0.145	0.153	0.064	0.741	27804.46	0.0488	23.36%	0.000
0.0700	0.980	0.168	0.158	0.150	0.159	0.071	0.786	29198.11	0.0516	27.44%	0.000

Fuente: Elaboración propia

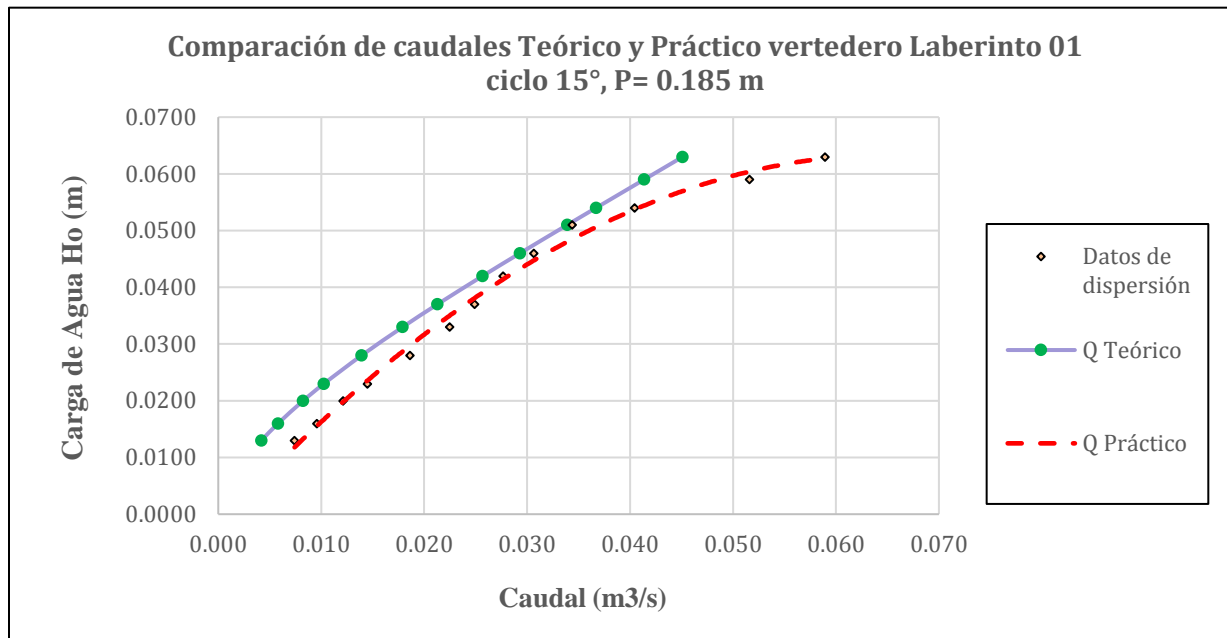


Figura 73. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m

Fuente: Elaboración propia

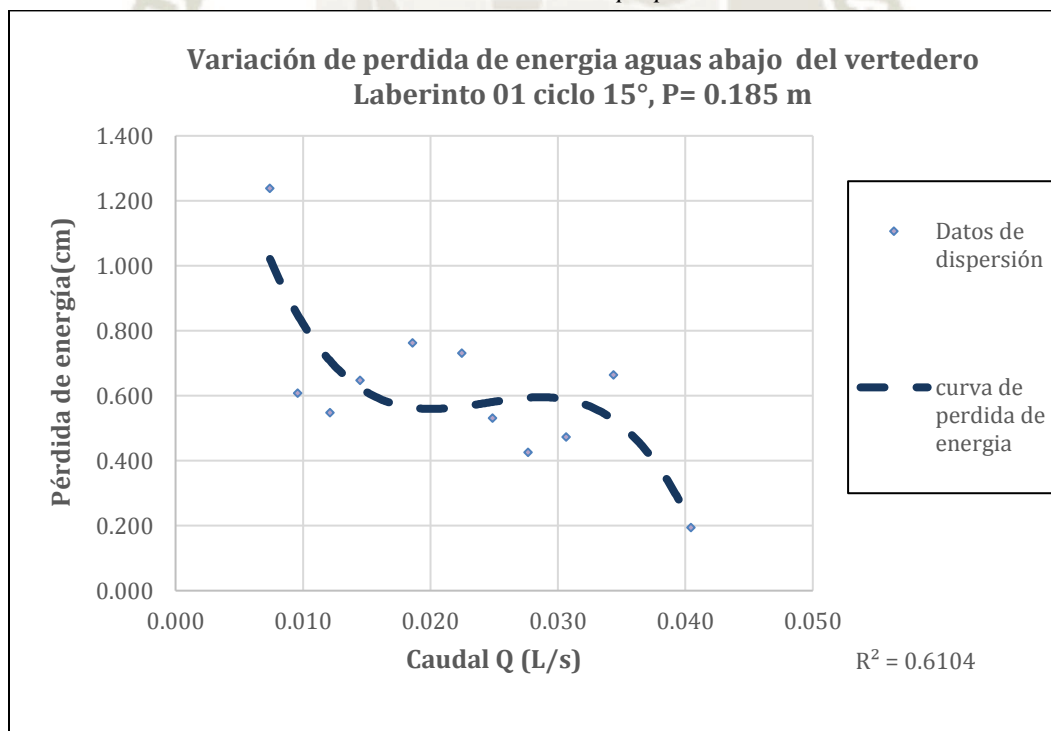


Figura 74 Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.185m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía(cm)
0.0140	0.323	0.053	0.050	0.048	0.050	0.007	0.459	6685.53	0.0049	34.22%	0.974
0.0160	0.360	0.055	0.053	0.050	0.053	0.009	0.500	7308.26	0.0060	30.62%	0.804
0.0220	0.483	0.065	0.061	0.059	0.062	0.014	0.621	9499.61	0.0098	28.30%	0.478
0.0270	0.498	0.073	0.071	0.068	0.071	0.016	0.598	10988.32	0.0132	17.93%	0.386
0.0310	0.513	0.084	0.081	0.078	0.081	0.019	0.575	12714.55	0.0160	15.56%	0.519
0.0330	0.538	0.088	0.084	0.079	0.084	0.021	0.593	13322.67	0.0175	15.03%	0.356
0.0380	0.581	0.092	0.090	0.088	0.090	0.024	0.619	14660.27	0.0211	11.90%	0.072
0.0390	0.613	0.098	0.095	0.090	0.094	0.026	0.638	15596.38	0.0218	17.63%	0.103
0.0410	0.676	0.105	0.098	0.093	0.099	0.030	0.687	16730.64	0.0232	23.82%	0.119
0.0450	0.680	0.109	0.104	0.100	0.104	0.032	0.672	17721.79	0.0260	19.77%	0.049
0.0460	0.690	0.111	0.106	0.102	0.106	0.034	0.675	18123.50	0.0267	20.28%	0.042
0.0500	0.694	0.116	0.109	0.106	0.110	0.035	0.667	18837.59	0.0294	15.90%	0.000
0.0520	0.699	0.118	0.113	0.110	0.114	0.036	0.662	19440.13	0.0308	15.25%	0.000
0.0550	0.746	0.123	0.116	0.112	0.117	0.040	0.697	20325.27	0.0328	17.89%	0.000

Fuente: Elaboración propia

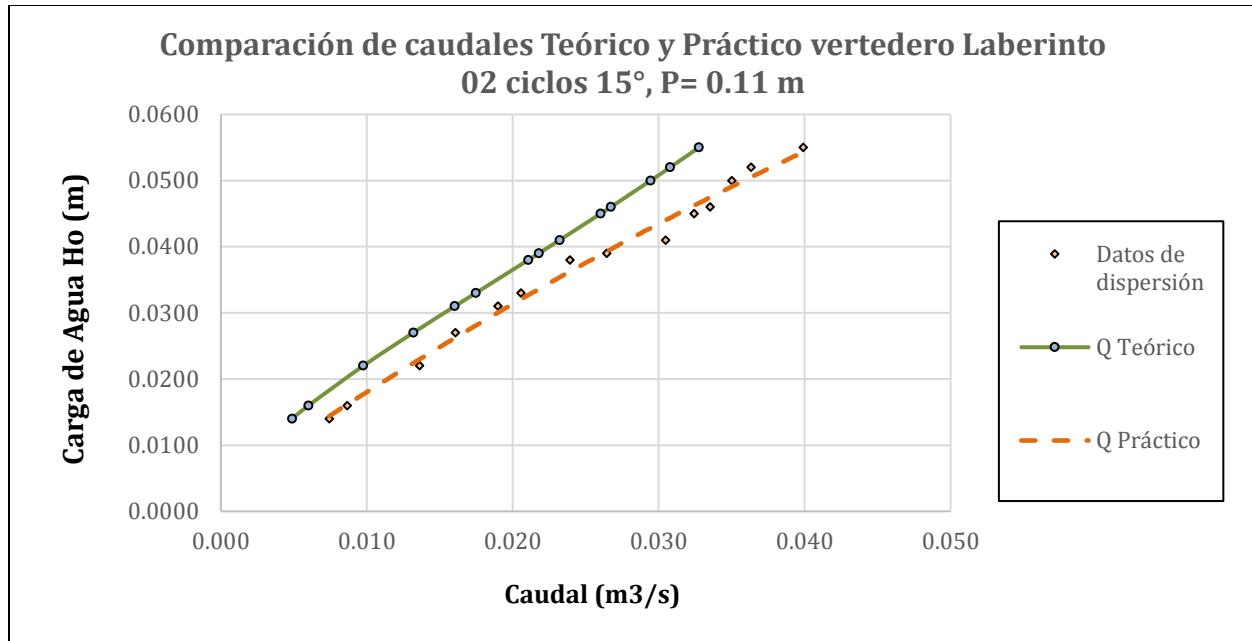


Figura 75. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

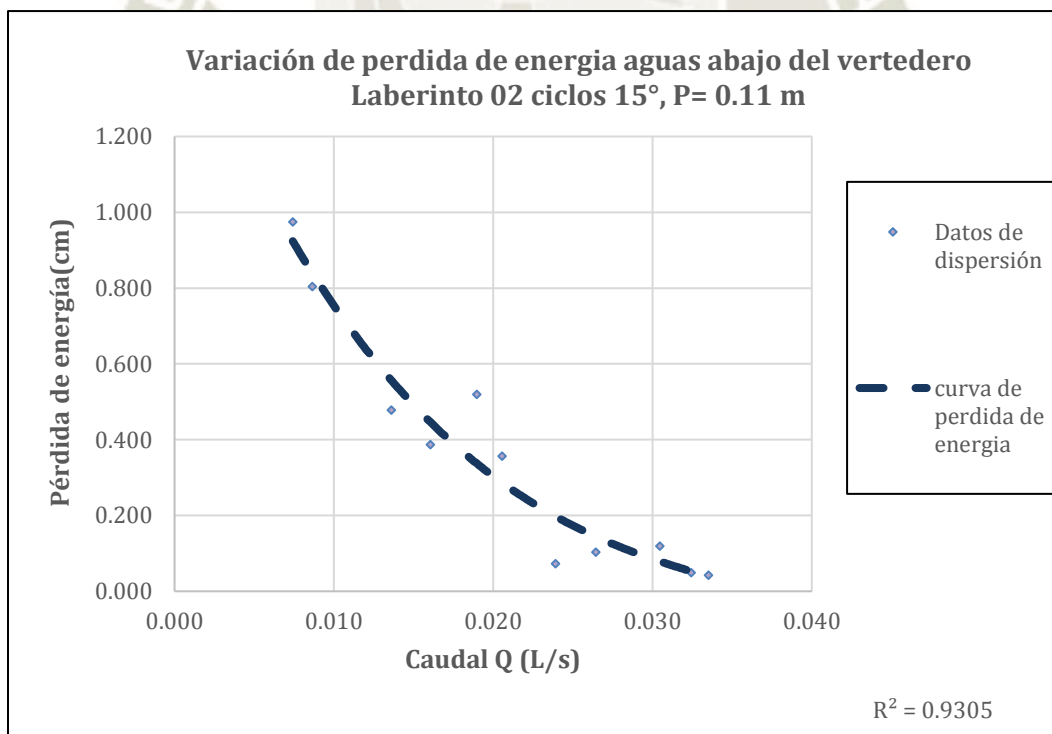


Figura 76. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, $P=0.075m$

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0140	0.292	0.049	0.048	0.046	0.048	0.006	0.426	6063.68	0.0050	21.99%	0.237
0.0160	0.325	0.054	0.053	0.051	0.053	0.008	0.452	7014.21	0.0060	22.59%	0.214
0.0180	0.368	0.058	0.056	0.054	0.056	0.009	0.496	7836.51	0.0072	23.62%	0.107
0.0190	0.405	0.063	0.061	0.058	0.061	0.011	0.525	8799.55	0.0078	30.80%	0.107
0.0230	0.439	0.067	0.066	0.064	0.066	0.013	0.546	9796.66	0.0101	23.02%	0.120
0.0255	0.448	0.071	0.070	0.068	0.070	0.014	0.542	10472.08	0.0116	18.62%	0.059
0.0320	0.565	0.081	0.079	0.076	0.079	0.020	0.643	12709.92	0.0154	24.16%	0.004
0.0365	0.585	0.088	0.085	0.082	0.085	0.023	0.640	13868.56	0.0179	21.18%	0.000
0.0405	0.606	0.093	0.091	0.087	0.090	0.025	0.644	14885.48	0.0200	19.89%	0.000
0.0470	0.649	0.100	0.095	0.093	0.096	0.028	0.669	16113.38	0.0234	17.85%	0.000

Fuente: Elaboración propia

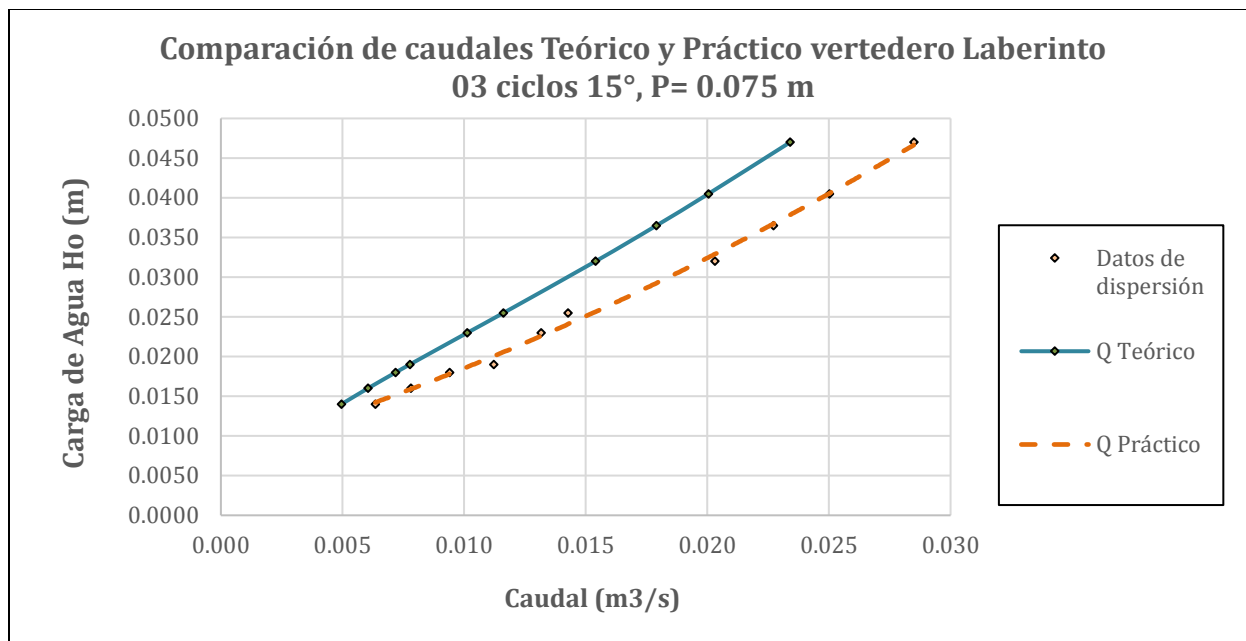


Figura 77. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m
Fuente: Elaboración propia

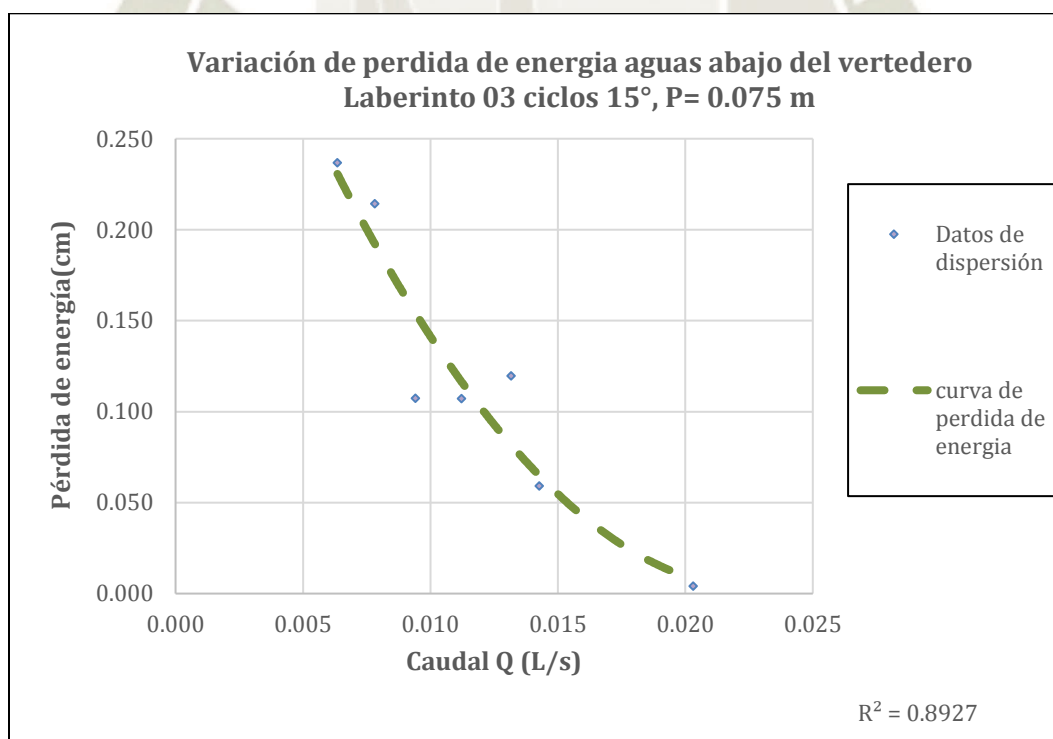


Figura 78. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.75m
Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, $P= 0.185m$

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom.	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0190	0.338	0.049	0.048	0.047	0.048	0.007	0.492	6497.27	0.0060	18.98%	0.526
0.0220	0.345	0.055	0.053	0.051	0.053	0.008	0.478	7233.22	0.0076	8.92%	0.115
0.0260	0.403	0.060	0.058	0.056	0.058	0.011	0.535	8400.49	0.0100	6.86%	0.475
0.0390	0.457	0.082	0.080	0.079	0.080	0.017	0.514	12149.02	0.0189	-12.81%	0.983
0.0424	0.535	0.085	0.083	0.081	0.083	0.020	0.593	13168.86	0.0215	-6.25%	0.952
0.0470	0.546	0.097	0.093	0.090	0.093	0.023	0.571	14933.78	0.0251	-7.88%	0.981
0.0500	0.565	0.103	0.096	0.093	0.097	0.025	0.578	15725.83	0.0276	-9.73%	1.193
0.0550	0.595	0.106	0.103	0.099	0.103	0.028	0.593	16834.02	0.0317	-13.53%	0.817
0.0580	0.694	0.112	0.109	0.106	0.109	0.035	0.672	18609.95	0.0342	1.08%	0.639
0.0590	0.704	0.120	0.115	0.113	0.116	0.037	0.660	19873.42	0.0351	6.08%	0.660
0.0630	0.735	0.126	0.122	0.120	0.123	0.041	0.670	21235.38	0.0384	6.73%	0.320
0.0670	0.752	0.129	0.125	0.123	0.126	0.043	0.677	21869.10	0.0418	3.11%	0.405
0.0700	0.806	0.139	0.135	0.130	0.135	0.050	0.702	23810.86	0.0444	10.57%	0.214
0.0760	0.952	0.141	0.135	0.127	0.134	0.058	0.830	24583.58	0.0495	15.40%	0.199

Fuente: Elaboración propia

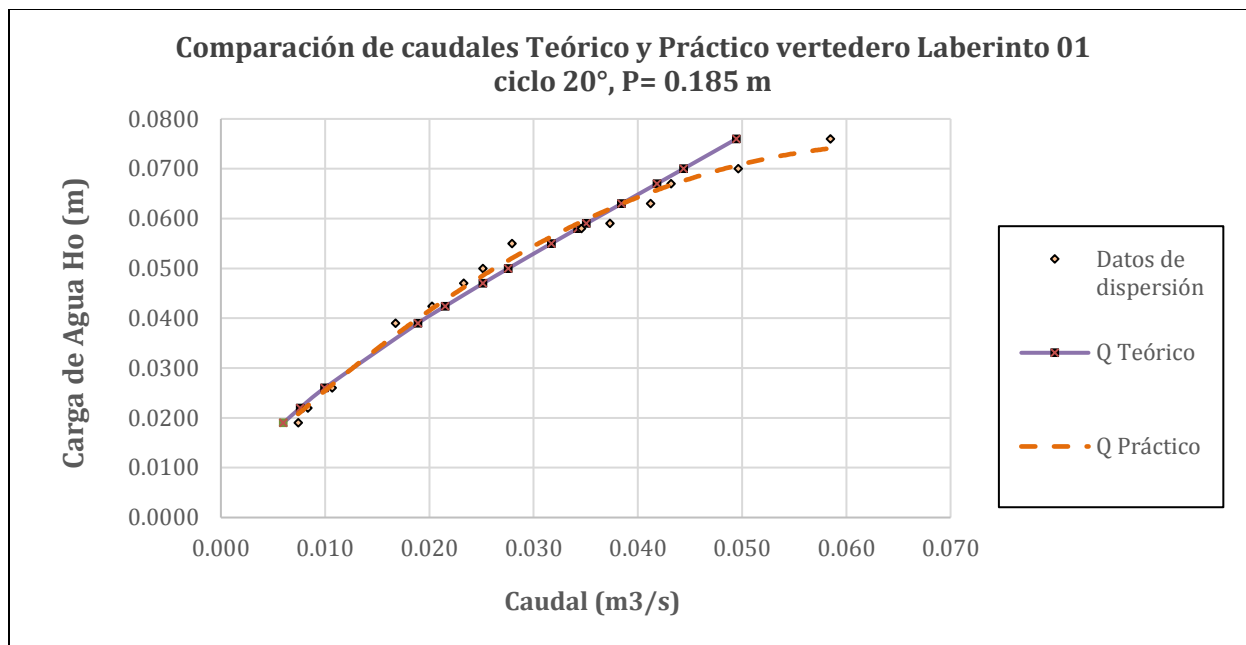


Figura 79 Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m
Fuente: Elaboración propia

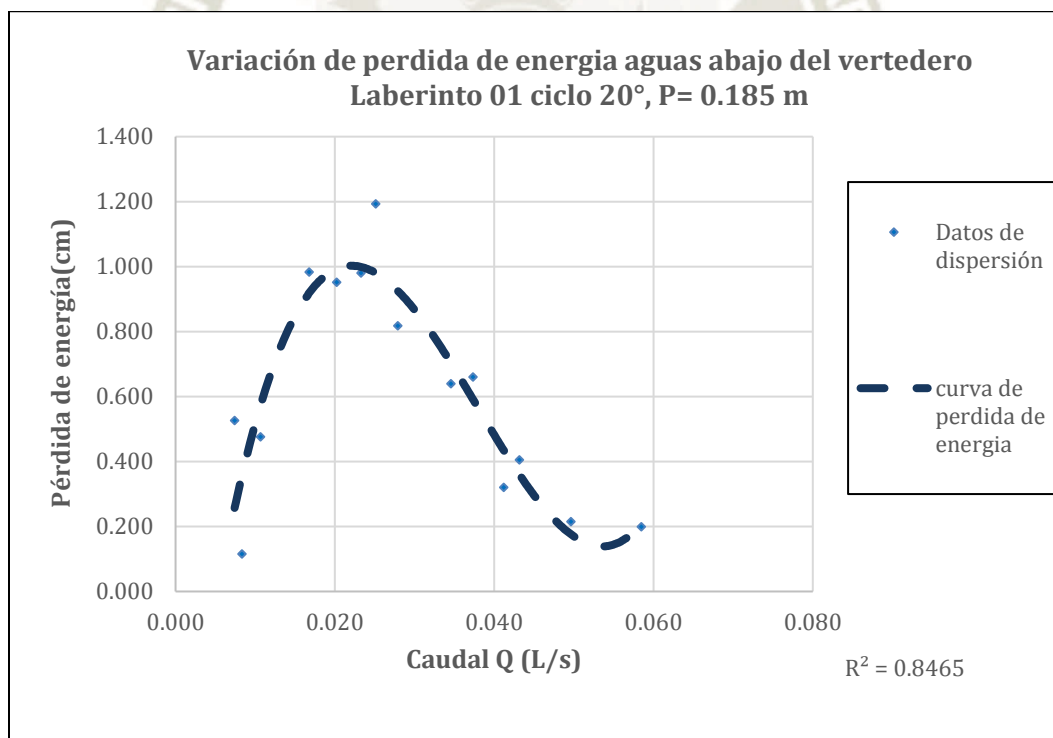


Figura 80. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m
Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0200	0.307	0.051	0.049	0.048	0.049	0.007	0.441	6415.41	0.0069	0.54%	1.040
0.0220	0.330	0.058	0.057	0.054	0.056	0.008	0.444	7553.20	0.0080	5.98%	0.724
0.0240	0.357	0.061	0.059	0.057	0.059	0.010	0.469	8164.28	0.0091	5.05%	0.453
0.0260	0.366	0.065	0.063	0.061	0.063	0.011	0.466	8803.66	0.0103	1.98%	0.394
0.0280	0.402	0.070	0.068	0.066	0.068	0.012	0.492	9834.50	0.0116	7.36%	0.390
0.0310	0.521	0.077	0.074	0.072	0.074	0.018	0.610	11723.68	0.0134	23.99%	0.440
0.0340	0.541	0.080	0.078	0.076	0.078	0.019	0.618	12440.29	0.0154	20.21%	0.418
0.0360	0.575	0.087	0.085	0.082	0.085	0.022	0.631	13746.41	0.0167	25.02%	0.333
0.0380	0.617	0.089	0.086	0.084	0.086	0.024	0.671	14297.52	0.0180	26.18%	0.175
0.0410	0.645	0.093	0.090	0.088	0.090	0.027	0.685	15136.66	0.0199	25.12%	0.136
0.0450	0.676	0.101	0.096	0.092	0.096	0.030	0.695	16334.99	0.0226	24.18%	0.393
0.0500	0.730	0.106	0.102	0.097	0.102	0.034	0.731	17569.35	0.0258	23.97%	0.056
0.0520	0.741	0.107	0.103	0.098	0.103	0.035	0.738	17804.13	0.0271	22.13%	0.000
0.0580	0.752	0.117	0.109	0.105	0.110	0.038	0.723	19200.72	0.0308	18.67%	0.000
0.0630	0.758	0.119	0.116	0.110	0.115	0.040	0.713	20047.97	0.0339	14.81%	0.000
0.0650	0.800	0.123	0.119	0.110	0.117	0.043	0.746	20709.22	0.0351	18.09%	0.000
0.0690	0.820	0.135	0.128	0.120	0.128	0.048	0.732	22653.84	0.0376	21.44%	0.000
0.0820	0.855	0.143	0.131	0.125	0.133	0.052	0.748	23812.97	0.0455	12.41%	0.000

Fuente: Elaboración propia

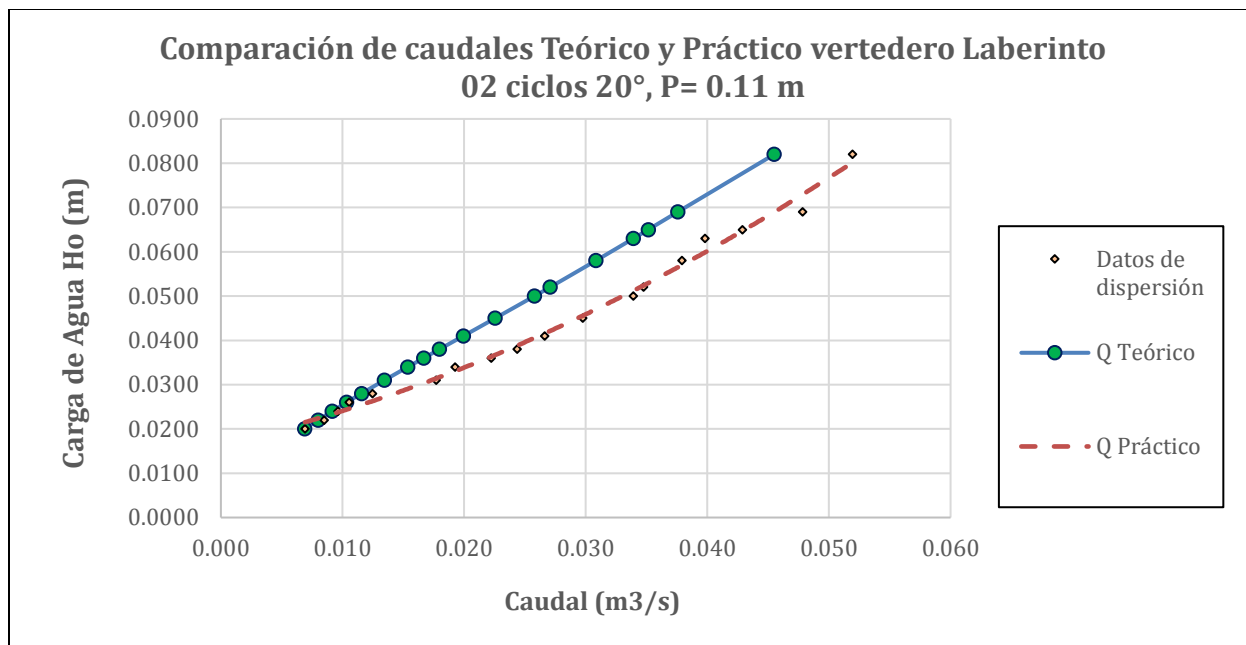


Figura 81. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

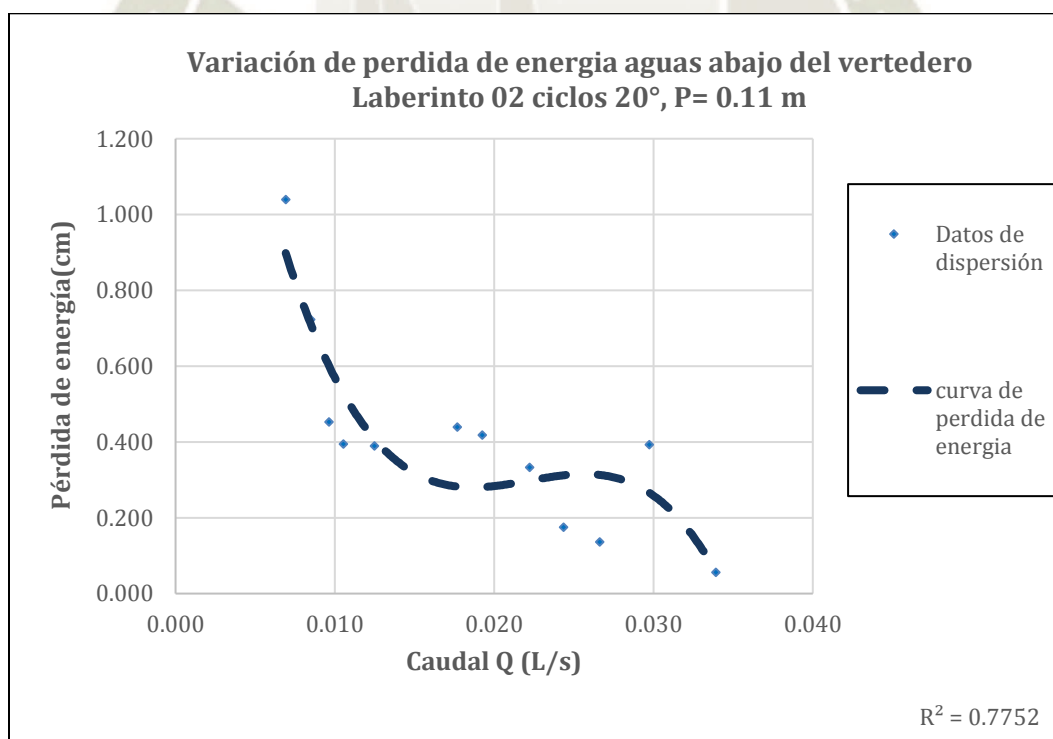


Figura 82. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Datos de condiciones aguas abajo del vertedero en laberinto 20°, 03 ciclos, $P= 0.075m$

Ho(m)	Velocidad de salida (Vs)	T1	T2	T3	T Prom.	Q Práctico	Fr salida (Frs)	Re Salida (Res)	Q Teórico	Diferencia (%)	Disipación de energía (cm)
0.0160	0.360	0.050	0.049	0.048	0.049	0.008	0.519	0.00	0.0050	38.27%	0.288
0.0190	0.376	0.052	0.050	0.049	0.050	0.009	0.535	0.00	0.0065	25.26%	0.226
0.0220	0.379	0.058	0.056	0.054	0.056	0.010	0.511	0.01	0.0080	17.20%	0.206
0.0240	0.400	0.061	0.059	0.056	0.059	0.011	0.527	0.01	0.0091	15.20%	0.249
0.0270	0.446	0.067	0.065	0.062	0.065	0.013	0.561	0.01	0.0107	18.81%	0.166
0.0320	0.495	0.076	0.073	0.070	0.073	0.017	0.585	0.01	0.0134	18.84%	0.161
0.0370	0.565	0.081	0.078	0.076	0.078	0.020	0.644	0.01	0.0160	20.67%	0.099
0.0410	0.595	0.084	0.081	0.078	0.081	0.022	0.668	0.02	0.0181	17.84%	0.001
0.0430	0.621	0.088	0.085	0.081	0.085	0.024	0.682	0.02	0.0191	20.45%	0.000
0.0570	0.725	0.100	0.096	0.091	0.096	0.032	0.748	0.02	0.0262	17.37%	0.000

Fuente: Elaboración propia

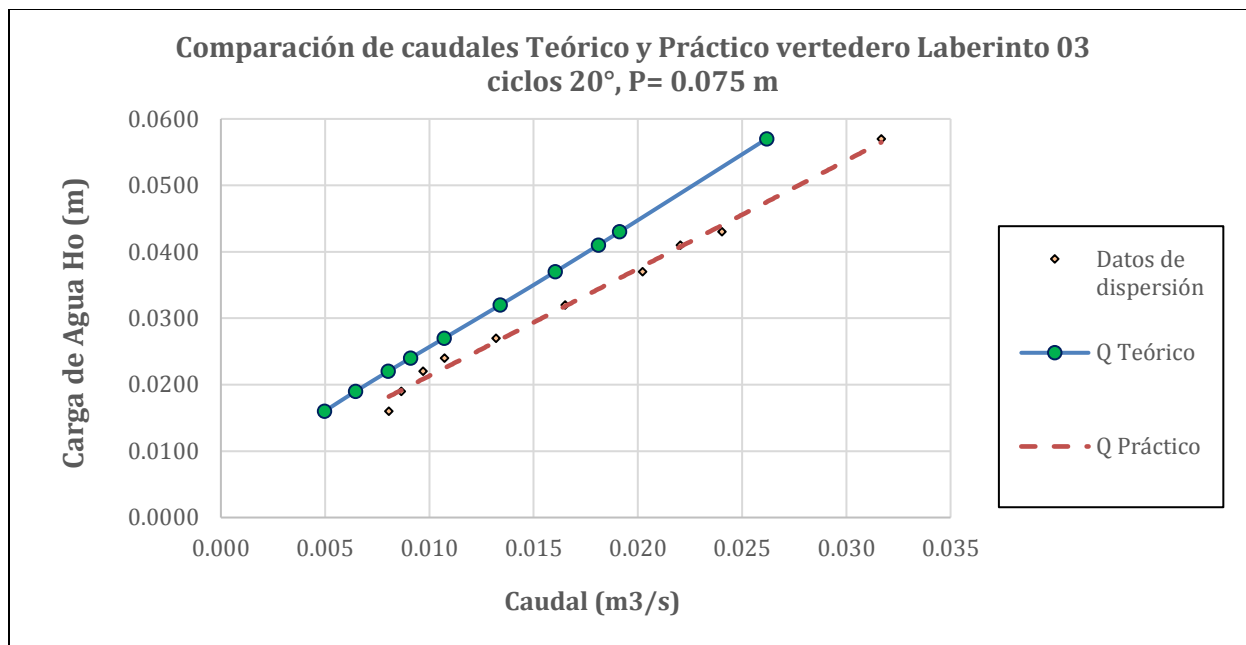


Figura 83. Gráfica de comparación entre el caudal teórico y el caudal práctico del vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

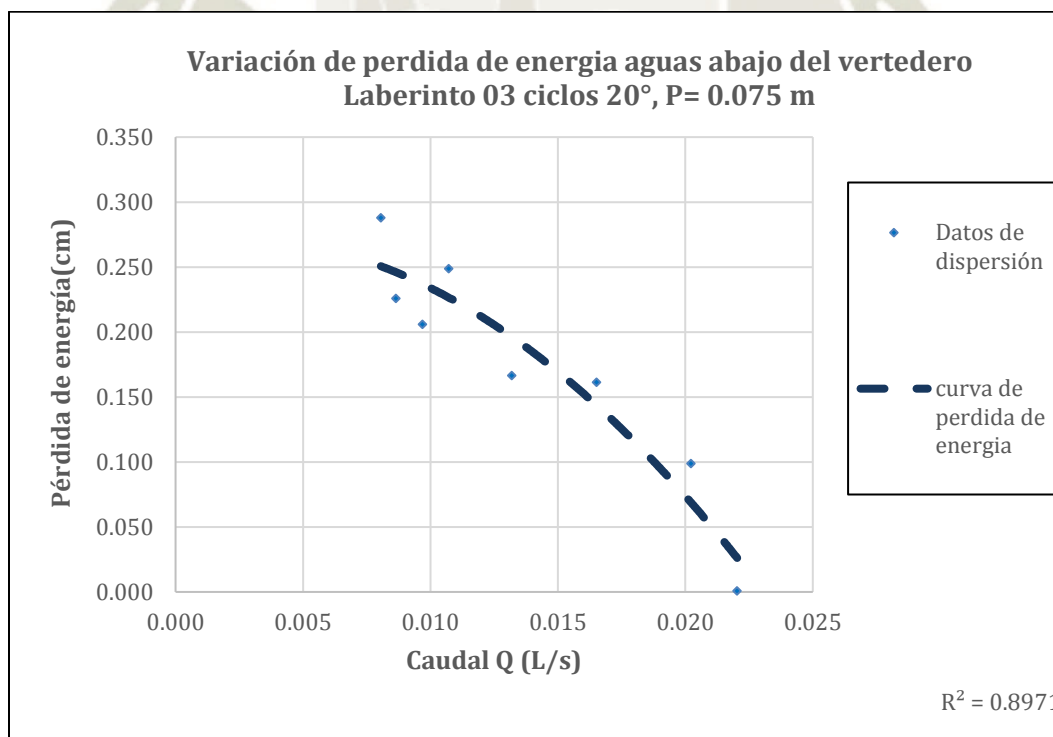


Figura 84. Gráfica de variación de pérdida de energía vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

Los valores de las presiones se muestran en las tablas N° 29, 30 y 31 para cada tipo de vertedero clasificándolos de acuerdo al número de ciclos y altura de paramento semejantes. Estos valores fueron calculados a partir de los datos de salida calibrados por el Datalogger, mismos que se encuentran en unidades de “miliamperios”. Se Tomó una presión inicial cuando el sistema se encontraba sin presencia de agua para hallar la variación con respecto a los valores que resultan luego de pasar agua por el sistema. Es por ello que fue necesario recalcular dichos datos a partir del rango de los valores de salida de los sensores periféricos que se muestran en la tabla N° 7 (-100mbar a 100 mbar), y expresarlos en unidades de centímetros de columna de agua.

La figura 85 muestra los puntos distribuidos en los vertederos de 01 ciclo y $P = 0.185 \text{ m}$

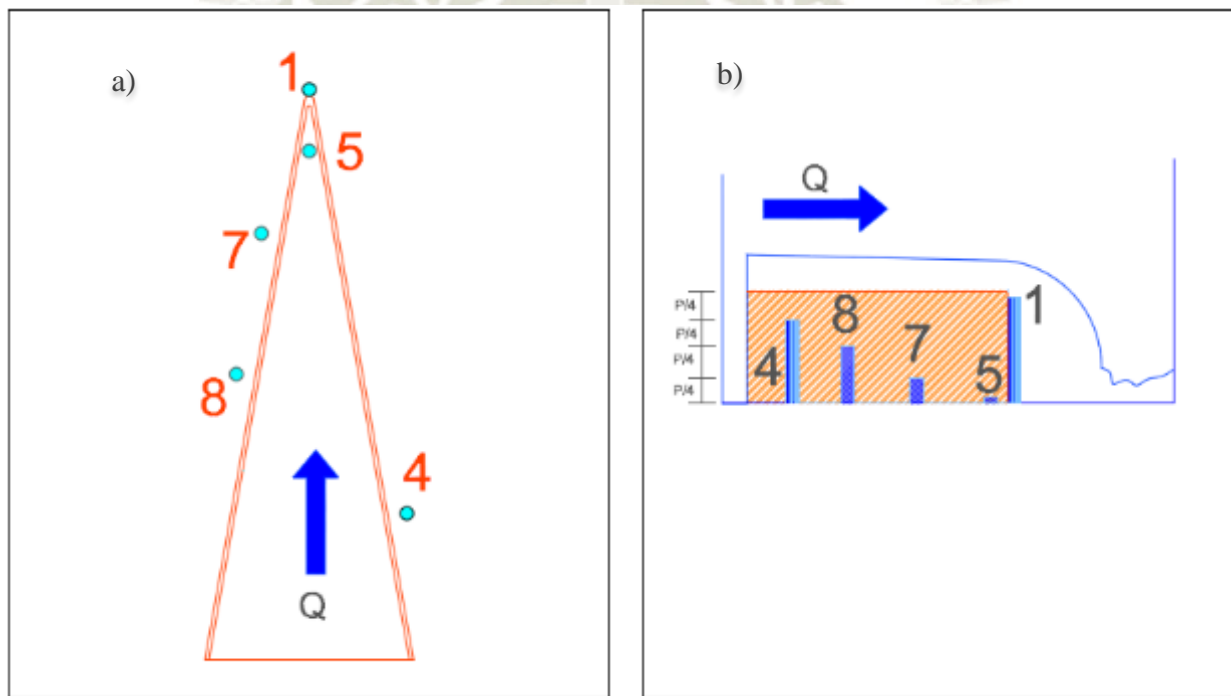


Figura 85. Puntos de toma de presiones en vertederos de 01 ciclo $P = 0.185 \text{ m}$
Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 01 ciclo y $P = 0.185$

Variación de Presiones en vertederos en laberinto de 01 ciclo, $P = 0.185 \text{ m}$						
Gados	Caudal	S1	S4	S5	S7	S8
10°	0.007	5.2132991	5.2897778	19.170665	4.0661184	42.815334
	0.009	5.4554817	5.238792	20.356085	3.9514003	43.312446
	0.013	7.4949141	6.0290721	20.853196	2.8806983	45.147935
	0.015	6.9213238	5.9525934	21.044393	1.2746453	45.810751

	0.019	6.4242121	5.7996359	21.579744	1.4403491	48.83166
	0.024	6.0290721	6.6409018	21.732702	1.4403491	49.774898
	0.028	6.194776	4.2828081	22.229813	6.4114657	52.311442
	0.033	5.5956927	7.1889993	23.096572	7.3674496	53.471369
	0.037	6.1437902	6.309494	23.03284	8.1832226	53.509608
	0.041	6.9340702	6.5644231	23.045586	9.0882207	55.000943
	0.046	6.4369586	5.5064675	23.810374	8.33618	55.319604
	0.049	6.730127	11.153146	23.721148	10.92371	54.299888
	0.055	6.8448451	10.439345	24.320232	15.563419	55.115661
15°	0.006	1.0961949	0.6245762	19.973691	1.0324627	5.5447069
	0.01	1.2746453	0.1529574	20.432564	0.0637323	6.334987
	0.012	1.4785885	0.0637323	21.069886	-0.79028	8.73132
	0.014	1.1216878	0.5990833	20.878689	-1.504081	8.3999123
	0.019	0.9814769	6.9340702	22.319039	-4.56323	11.484554
	0.022	1.7207711	7.1380135	22.395517	-2.816966	13.371029
	0.025	1.0069698	6.8320986	22.918122	3.6072461	14.148562
	0.028	0.7647872	7.4694212	23.593684	4.8054126	16.404685
	0.033	-0.318661	6.2967476	23.529952	6.9723096	17.003768
	0.039	0.9049981	6.3859728	24.43495	7.9537864	15.652644
	0.045	-0.548097	3.9259074	24.536921	9.9294866	18.762778
	0.051	1.0961949	2.5365441	24.932061	9.9804724	19.132425
	0.055	3.3778099	0.1529574	25.900792	12.249341	22.382771
	0.06	2.4855583	-2.613023	27.162691	9.5598395	21.082633
0.064	4.4230191	-0.739294	27.736281	9.4961072	22.675939	
20°	0.007	14.658421	9.8147685	20.827704	57.932627	0.280422
	0.01	13.676944	10.401105	20.751225	58.608189	0.5098581
	0.012	15.27025	10.630541	21.465026	58.697414	0.5098581
	0.017	15.346729	14.658421	23.937838	57.34629	0.280422
	0.02	13.51124	15.525179	22.905375	58.697414	0.9049981
	0.024	12.440538	16.175248	23.963331	58.608189	-0.089225
	0.027	15.754615	20.585521	22.892629	59.130794	-0.535351
	0.03	16.468417	17.870527	23.772134	56.836432	0.4716187
	0.033	16.047784	19.553058	23.21129	56.581503	-1.032463
	0.036	10.834485	18.520596	22.969108	58.35326	-1.223659
	0.04	15.996798	21.84742	24.498682	56.224603	-2.98267
	0.044	15.754615	23.415233	27.557831	60.647622	-6.271255
	0.048	17.845034	21.312069	25.288962	57.74143	-4.983863
	0.052	16.952782	23.886852	26.244946	59.57692	-4.77992

	0.055	16.799825	22.943615	28.539307	61.654591	-4.575976
--	-------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de dispersión muestran la variación de presiones, en puntos ubicados en posiciones semejantes de los vertederos de 10°, 15° y 20°; de 01 ciclo y P= 0.185m

Los sensores 1 y 4.- Ubicados en la punta de la cresta del vertedero de 01 ciclo y P= 0.185m. y en la pared lateral a una misma altura de la cresta respectivamente.

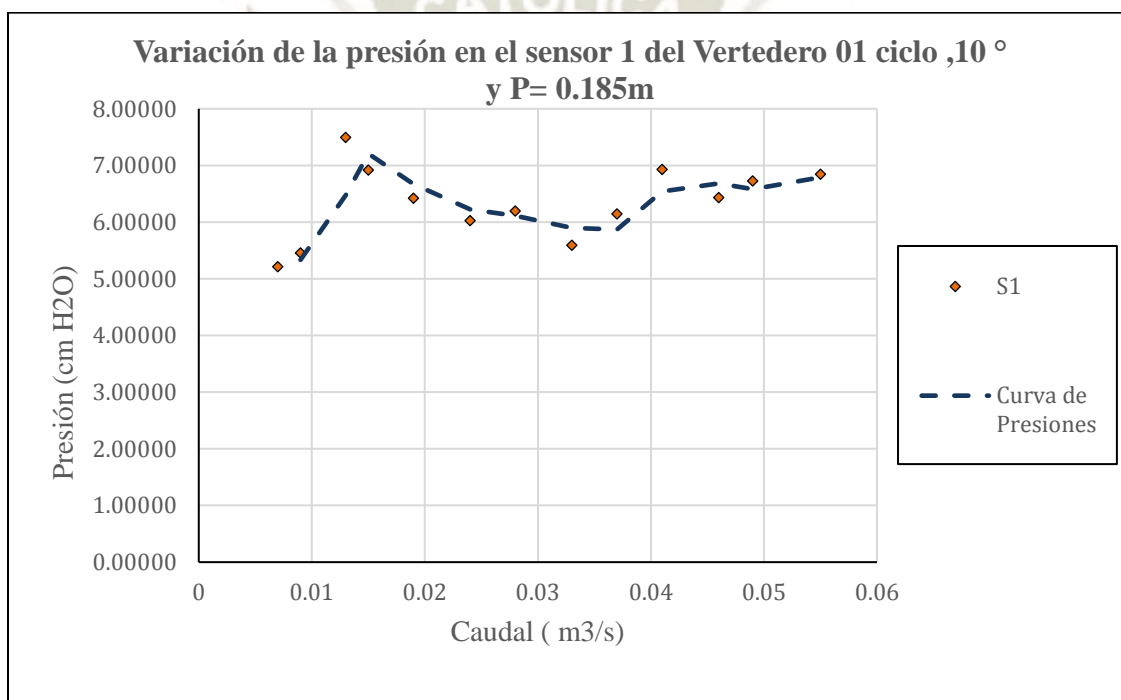


Figura 86. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)

Fuente: Elaboración propia

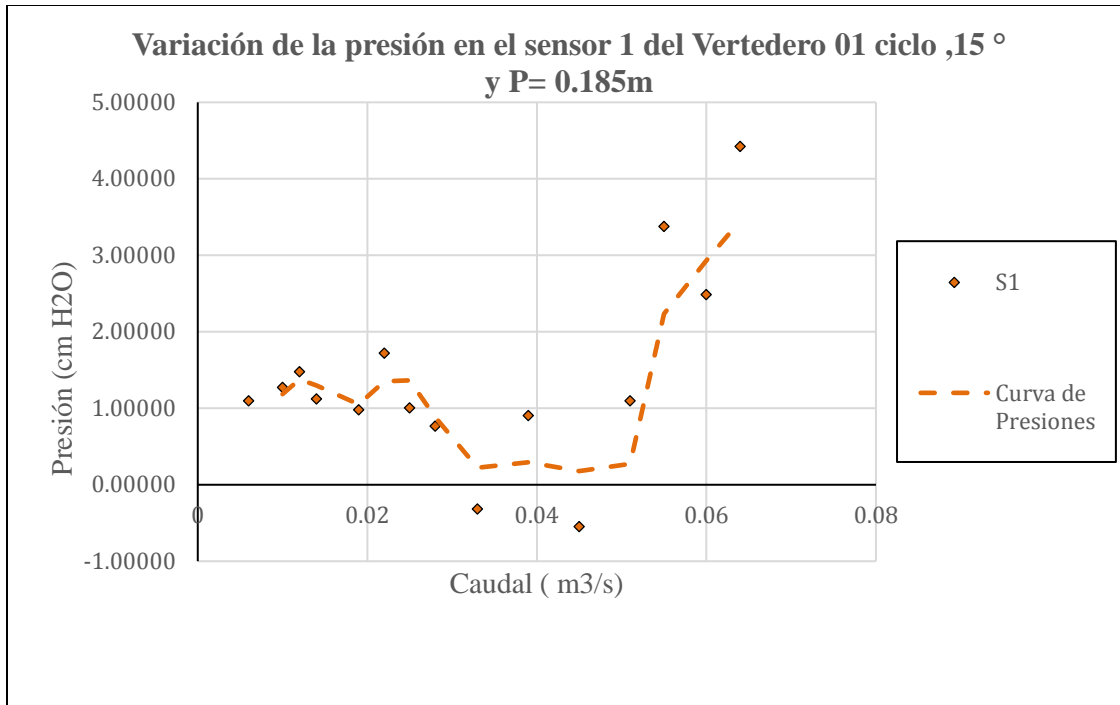


Figura 87. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

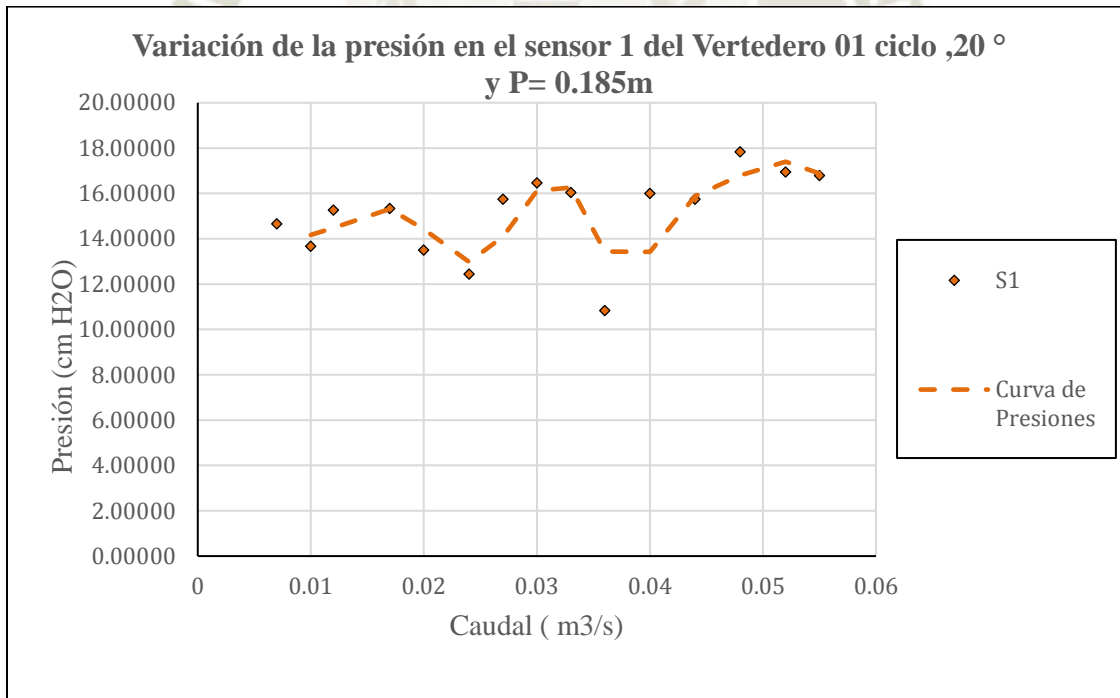


Figura 88. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

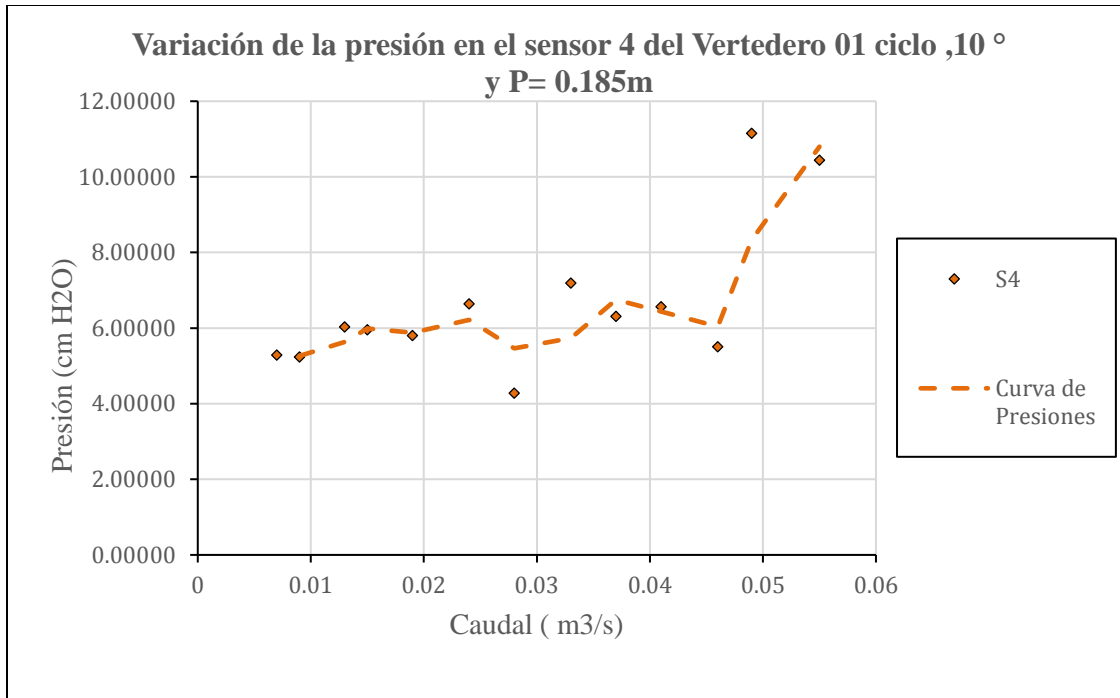


Figura 89. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

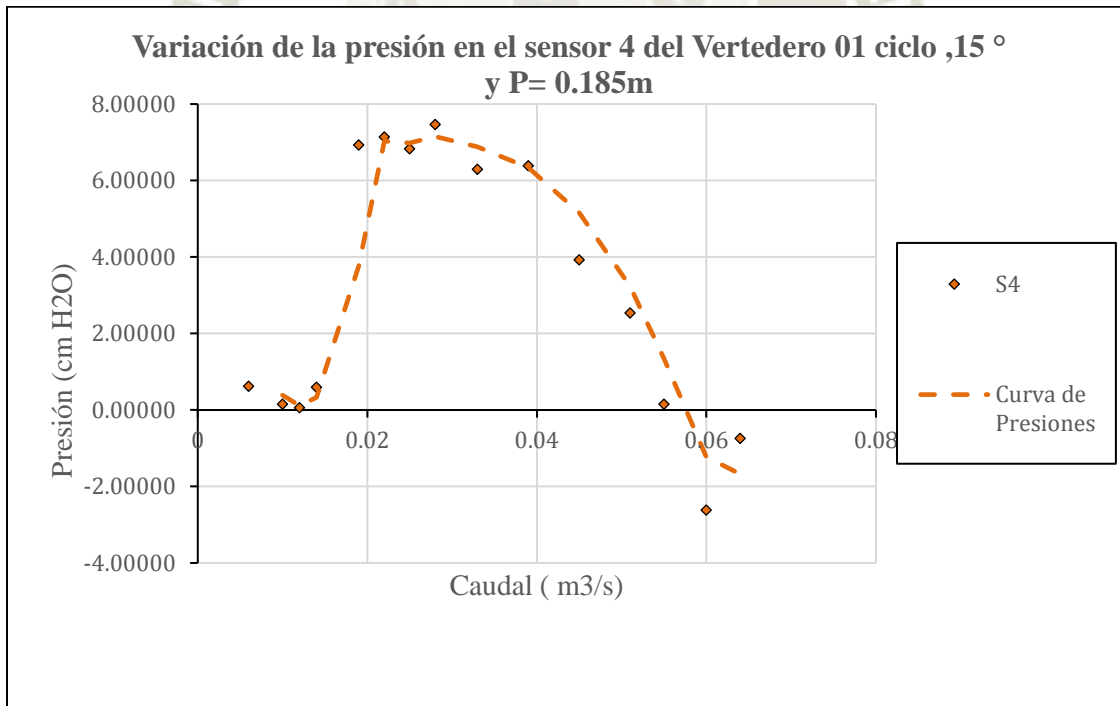


Figura 90. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

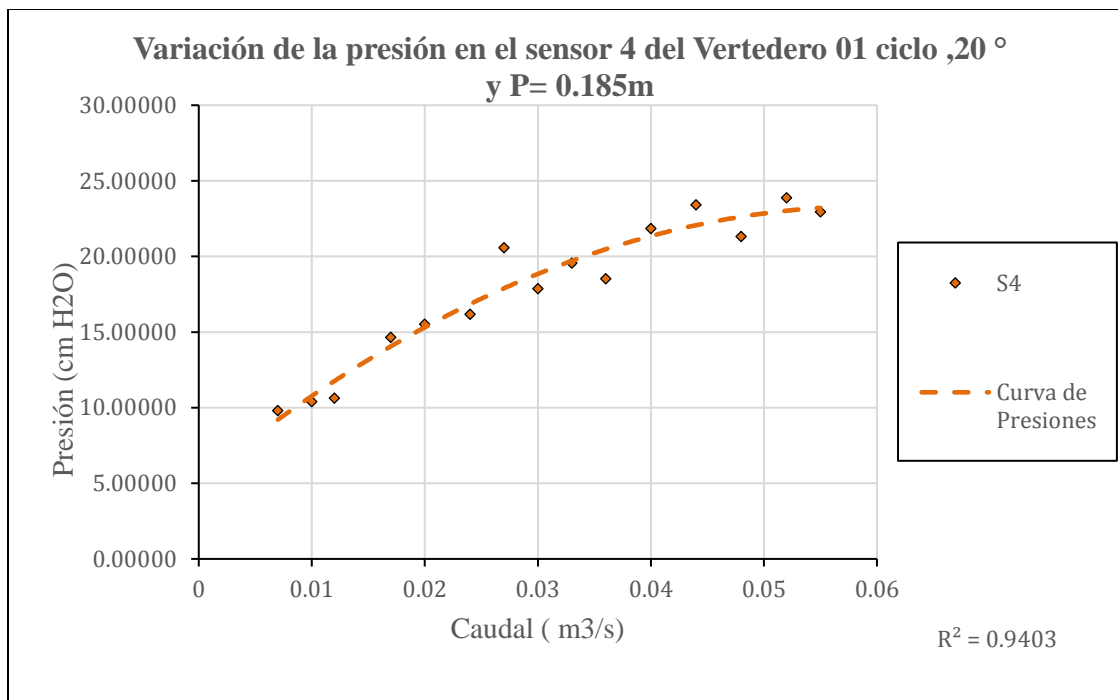


Figura 91. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

Sensor 5.- Ubicado a nivel de la base del vertedero, por detrás del ápice del mismo a 10 cm aguas arriba del sensor 1.

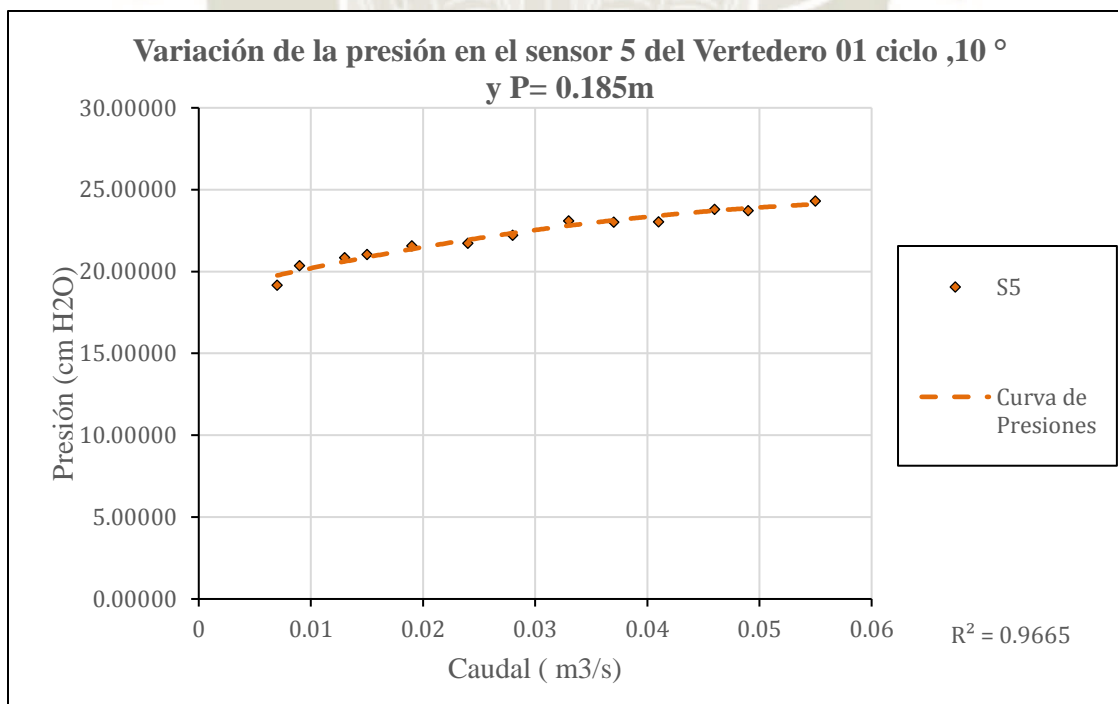


Figura 92. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

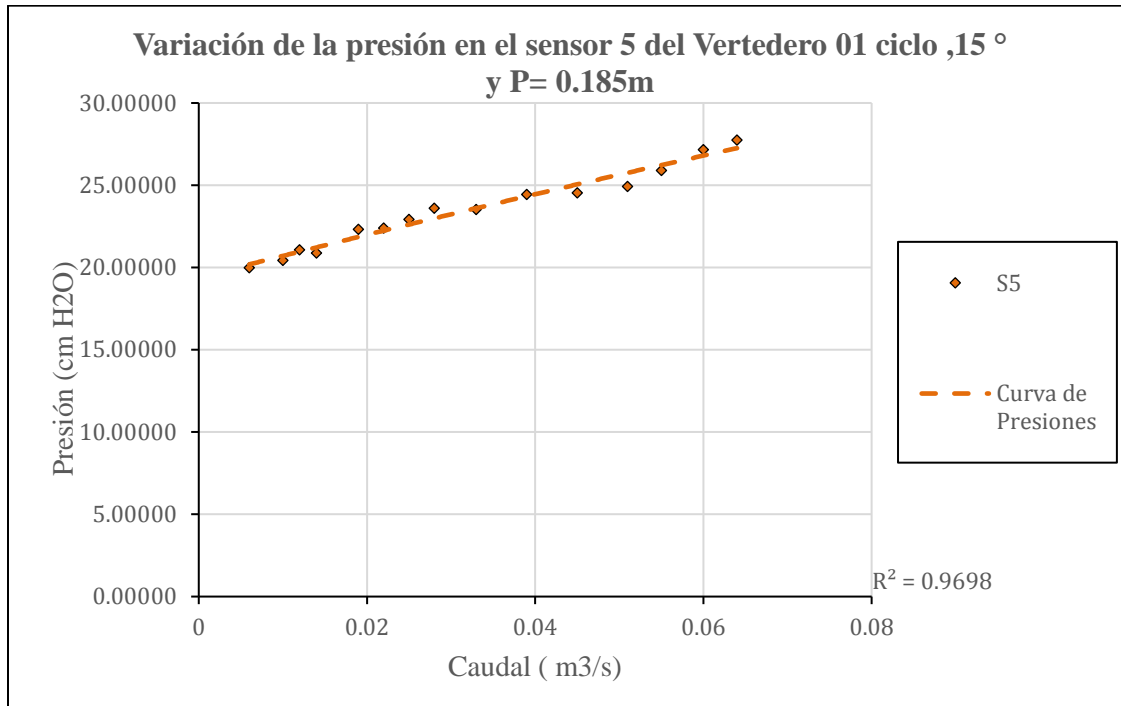


Figura 93. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,15° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

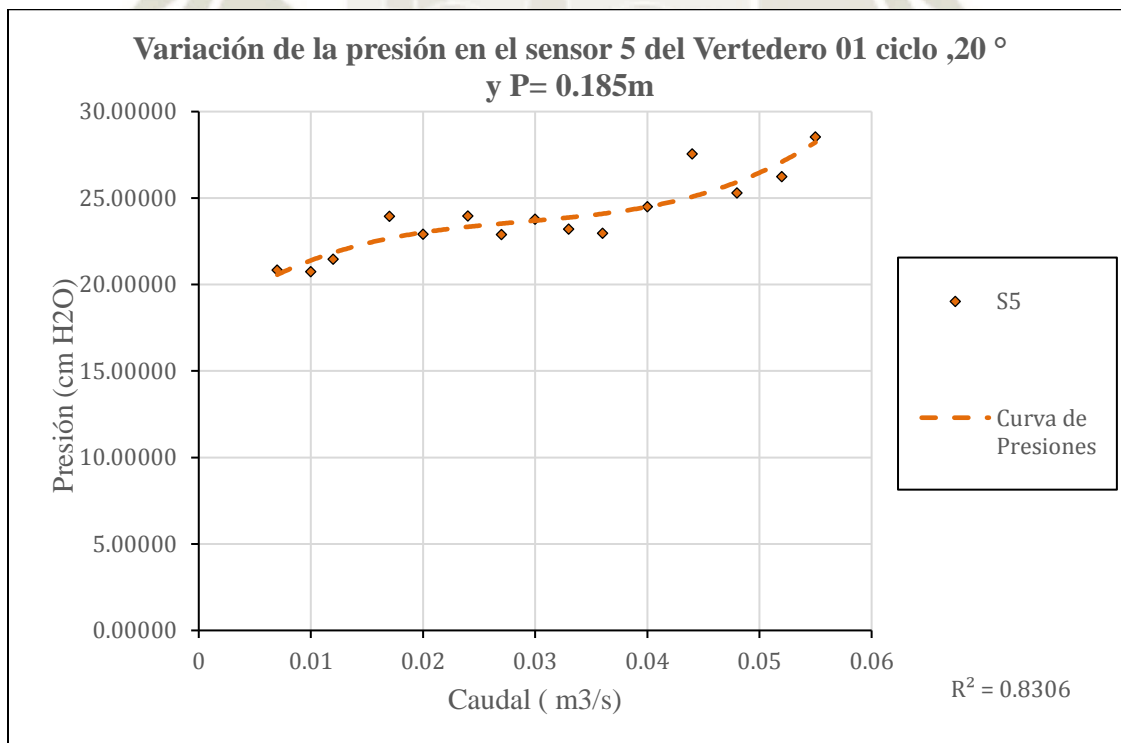
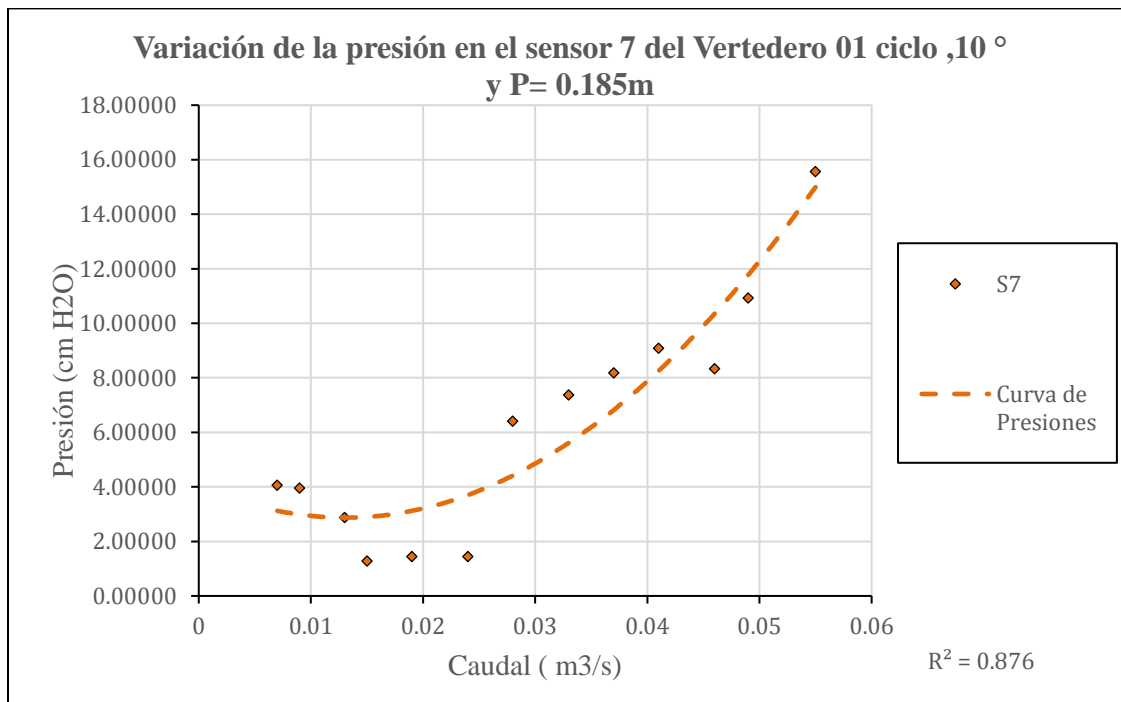


Figura 94. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 01 ciclo ,20° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

Sensor 7 y 8.- Ubicados en el lado izquierdo del vertedero, a $\frac{1}{4}$ de la altura del paramento desde la base del mismo y a la mitad de la altura del paramento respectivamente.



*Figura 95. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia*

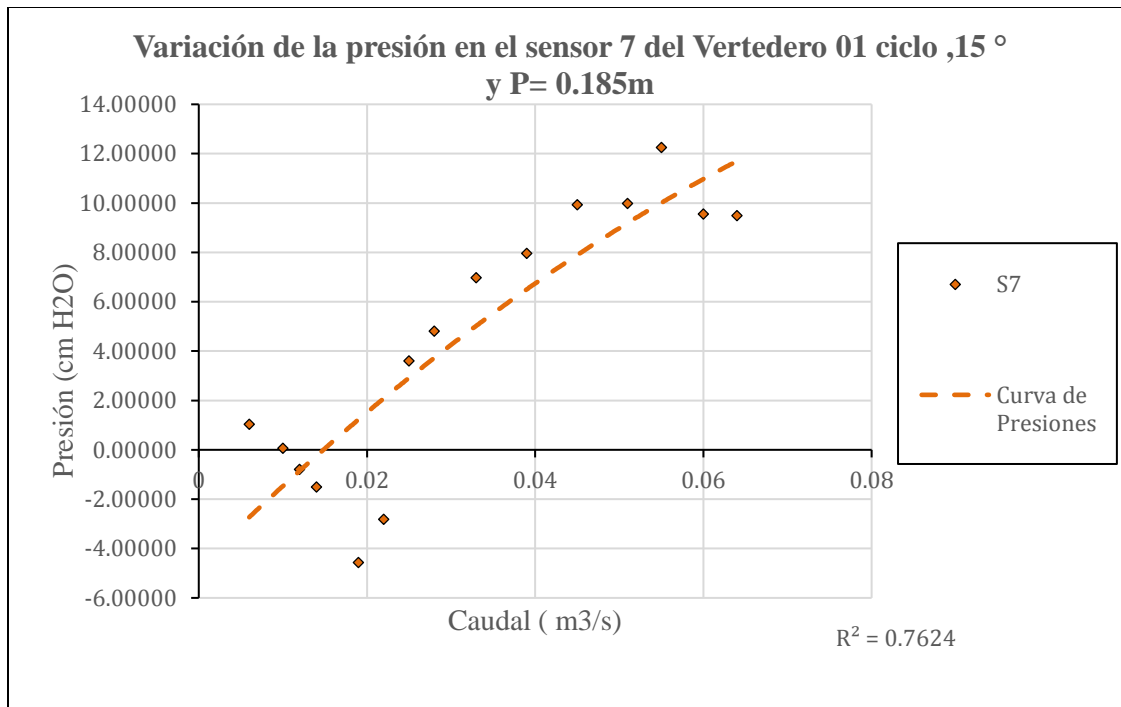


Figura 96. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)
Fuente Elaboración propia

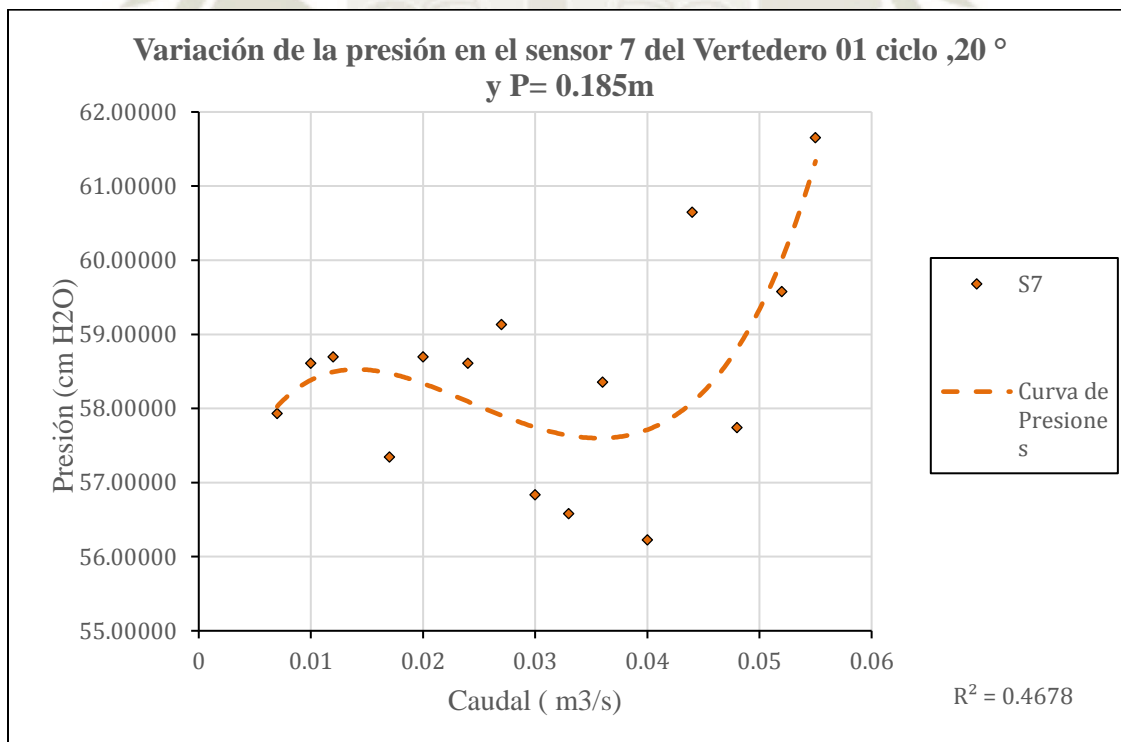
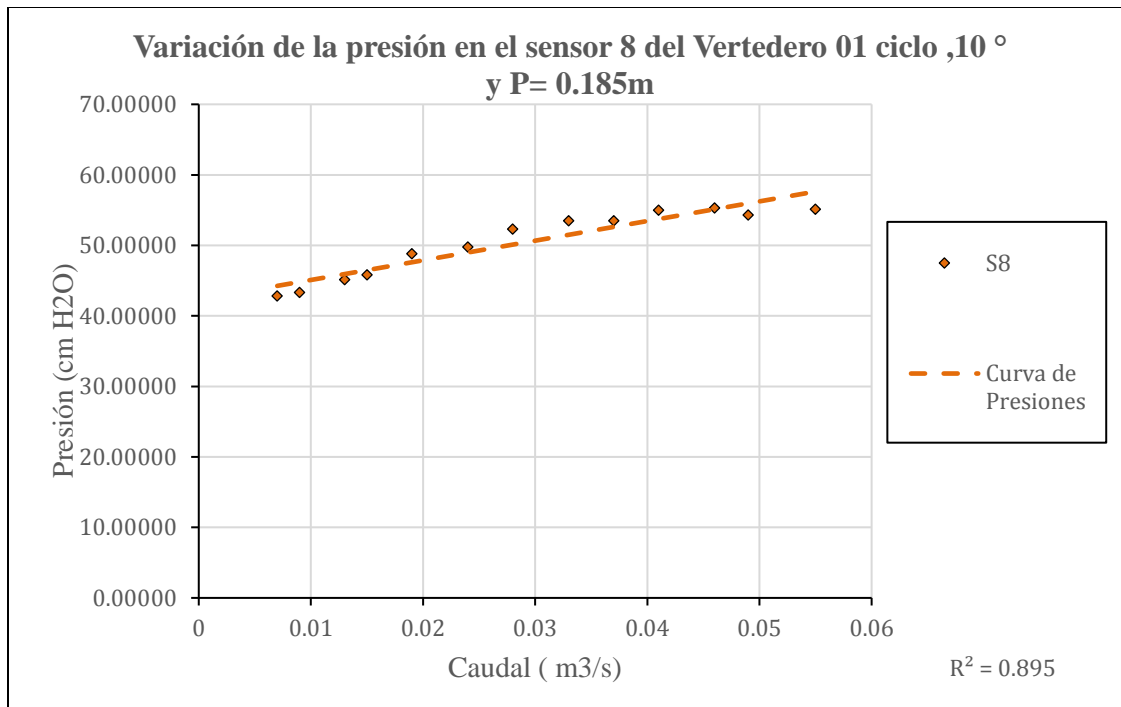
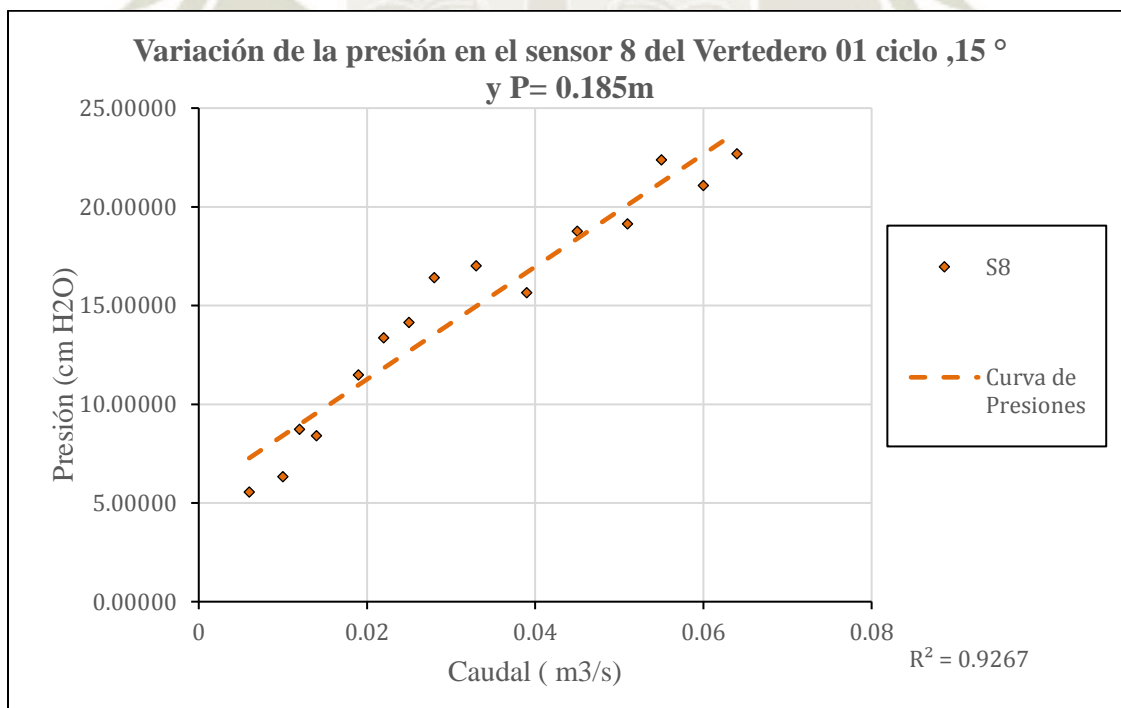


Figura 97. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia



*Figura 98. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,10 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 99. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,15 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia*

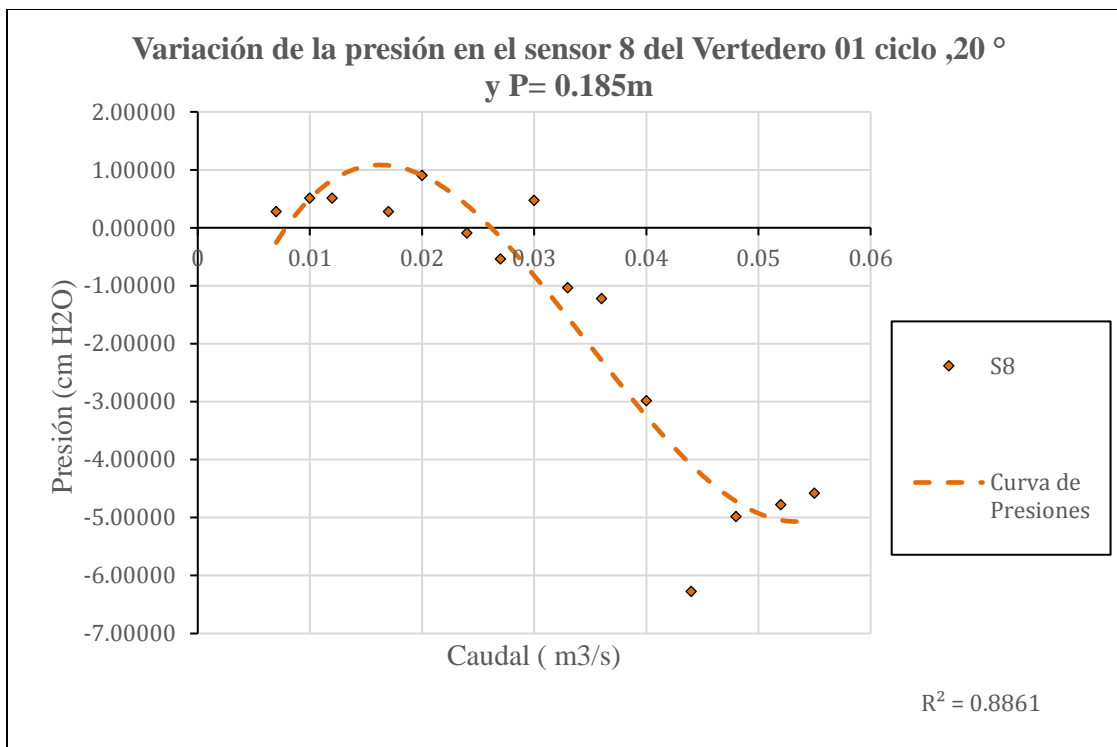


Figura 100. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 01 ciclo ,20 ° y P= 0.185m)
Fuente: Elaboración propia

La figura 101 muestra los puntos distribuidos en los vertederos de 02 ciclos y P = 0.11 m

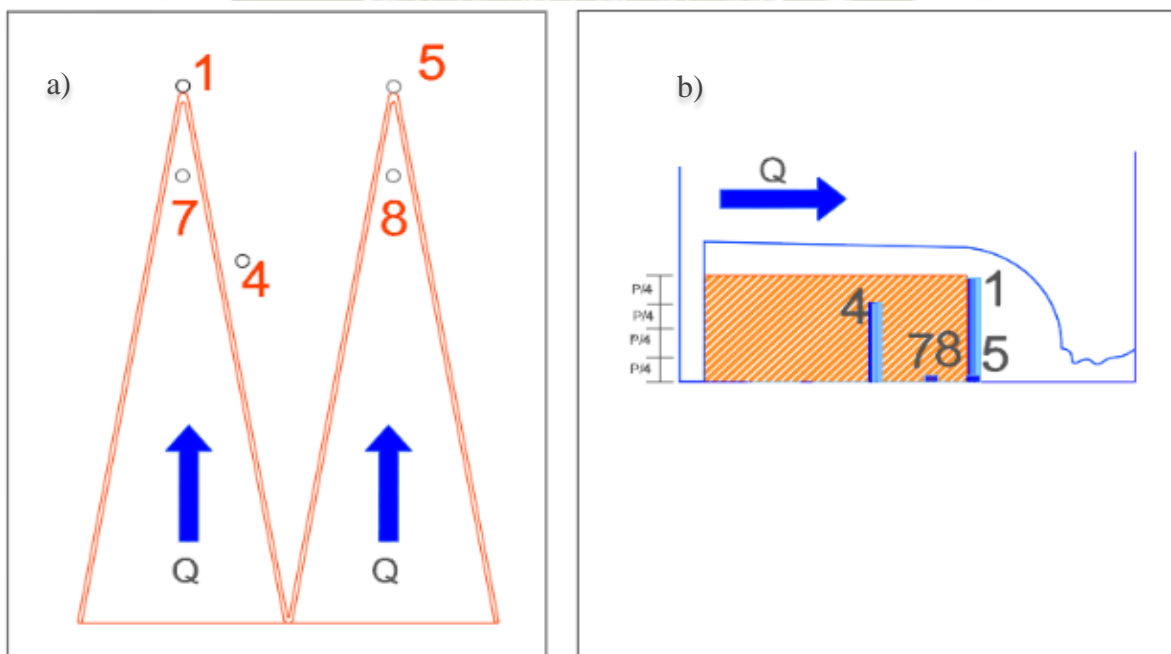


Figura 101. Puntos de toma de presiones en vertederos de 02 ciclos P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 02 ciclo y $P= 0.11$

Variación de Presiones en vertederos en laberinto de 02 ciclos, $P= 0.11$ m						
Gados	Caudal	S1	S4	S5	S7	S8
10°	0.00700	0.57359	0.21669	0.06630	7.65136	6.38153
	0.01000	0.91774	1.23641	0.04211	9.61882	6.32384
	0.01300	0.57359	0.43338	0.03473	10.21933	6.30624
	0.01600	2.10316	0.29317	0.00812	12.38354	6.24279
	0.01800	2.42183	0.63732	0.00315	12.78731	6.23095
	0.02000	0.81577	0.38239	-0.01142	13.97253	6.19620
	0.02200	0.53535	-1.65704	-0.03211	15.65554	6.14685
	0.02400	0.73929	-1.37662	-0.04338	16.57210	6.11998
	0.02600	1.12169	-0.53535	-0.04902	17.03039	6.10654
	0.02800	0.59908	-0.61183	-0.06116	18.01807	6.07759
	0.03000	1.92471	-0.20394	-0.07280	18.96467	6.04983
	0.03200	1.13443	0.20394	-0.09039	20.39562	6.00788
	0.03400	1.66979	0.01275	-0.10495	21.58005	5.97315
	0.03800	2.11591	1.55507	-0.12166	22.93910	5.93331
15°	0.00700	1.73352	2.98267	9.71280	10.94920	11.75223
	0.00900	2.53654	-0.01275	5.54471	10.70702	12.78469
	0.01300	-0.29317	0.70105	6.70463	12.35131	13.01413
	0.01500	0.03824	-0.90500	6.62816	11.98167	13.57497
	0.01800	-0.16570	-0.75204	8.05576	13.05237	13.68969
	0.02000	0.50986	-0.96873	9.11371	13.44751	13.74068
	0.02200	0.24218	0.03824	9.64906	13.66420	14.70941
	0.02400	1.23641	-0.81577	10.03146	13.63870	15.20652
	0.02600	0.50986	-0.90500	9.78928	14.65842	14.32701
	0.02800	1.40211	0.31866	11.26786	16.74884	16.12426
	0.03000	1.91197	0.65007	13.61321	14.64567	16.26447
	0.03200	3.53077	0.76479	13.01413	16.32821	15.55067
	0.03400	2.37084	-0.12746	13.09061	16.06053	15.98405
	0.03600	2.30711	-0.30591	14.13582	14.56920	16.41743
0.03800	2.33260	0.11472	13.76617	16.04778	16.34095	
20°	0.00700	0.10197	-0.03824	5.27703	12.28758	12.82293
	0.00900	0.10197	-0.03824	6.01633	12.32582	13.16709
	0.01100	-0.66282	0.02549	5.97809	13.98286	12.88666
	0.01300	0.84127	0.24218	6.16928	12.58075	13.40927
	0.01500	-0.19120	-0.44613	7.18900	13.51124	14.12307
	0.01700	0.56084	-2.34535	8.46364	15.23201	13.66420

0.01900	-0.68831	-2.54929	8.78231	14.69666	15.09180
0.02100	-1.79725	0.45887	10.14618	14.44173	14.78589
0.02300	-1.70802	0.26768	12.22385	12.52976	15.90757
0.02500	-1.30014	-3.12288	13.17983	14.08483	16.13701
0.02700	-0.44613	-2.17964	11.72674	14.96434	15.78011
0.02900	-0.68831	1.56781	15.32124	14.96434	17.29694
0.03100	0.14021	-0.29317	14.81138	15.99680	17.10574
0.03300	1.32563	0.90500	15.95856	16.99102	18.27841
0.03500	0.75204	0.75204	16.16250	18.25292	17.79405
0.03700	1.45310	0.58634	16.13701	18.16369	18.03623
0.04000	2.99542	0.12746	16.18799	16.92729	18.04898
0.04400	2.29436	2.42183	18.40588	19.36186	20.36883
0.04800	3.14837	1.36387	20.29235	19.51482	19.89721

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de dispersión muestran la variación de presiones, en puntos ubicados en posiciones semejantes de los vertederos de 10°, 15° y 20°; de 02 ciclos y P= 0.11m

Los sensores 1 y 4.- Ubicados en la punta de la cresta del vertedero de 01 ciclo y P= 0.11m. y en la pared lateral a una misma altura de la cresta respectivamente.

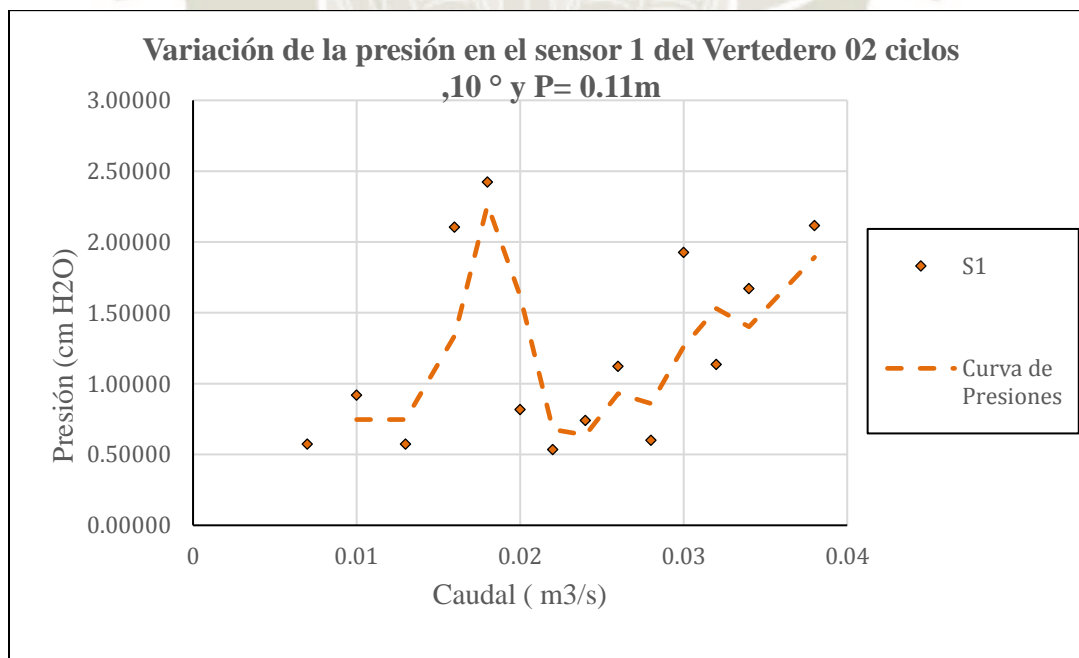


Figura 102. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 10° y P= 0.11m)

Fuente: Elaboración propia

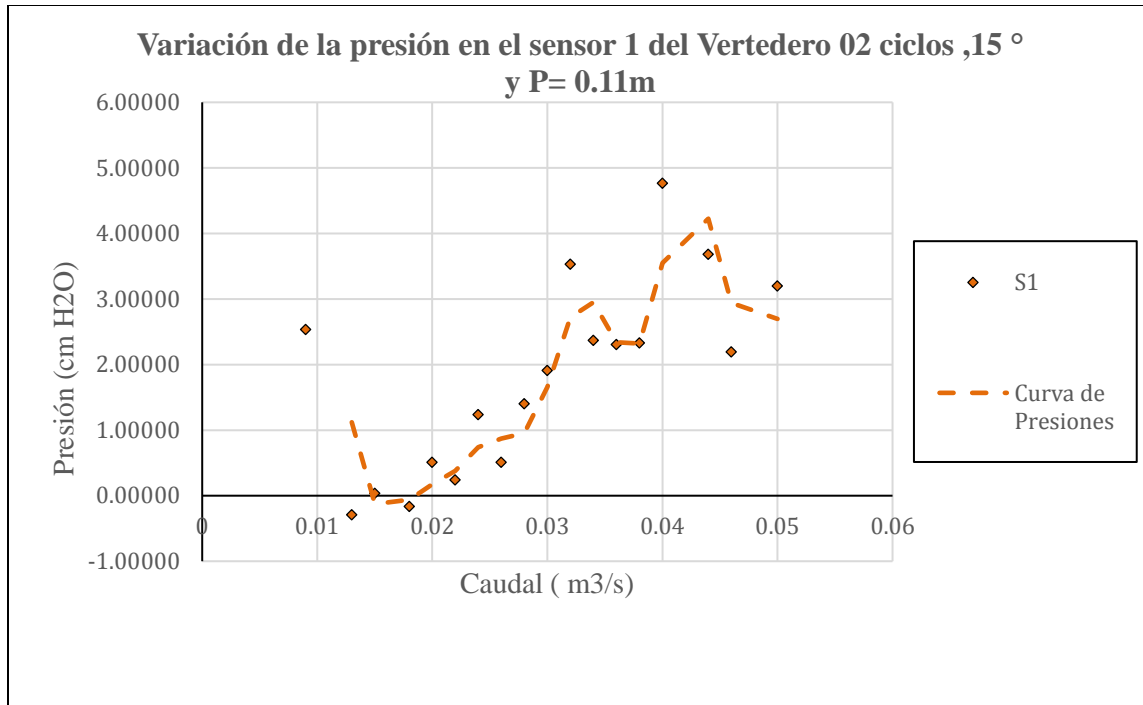


Figura 103. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

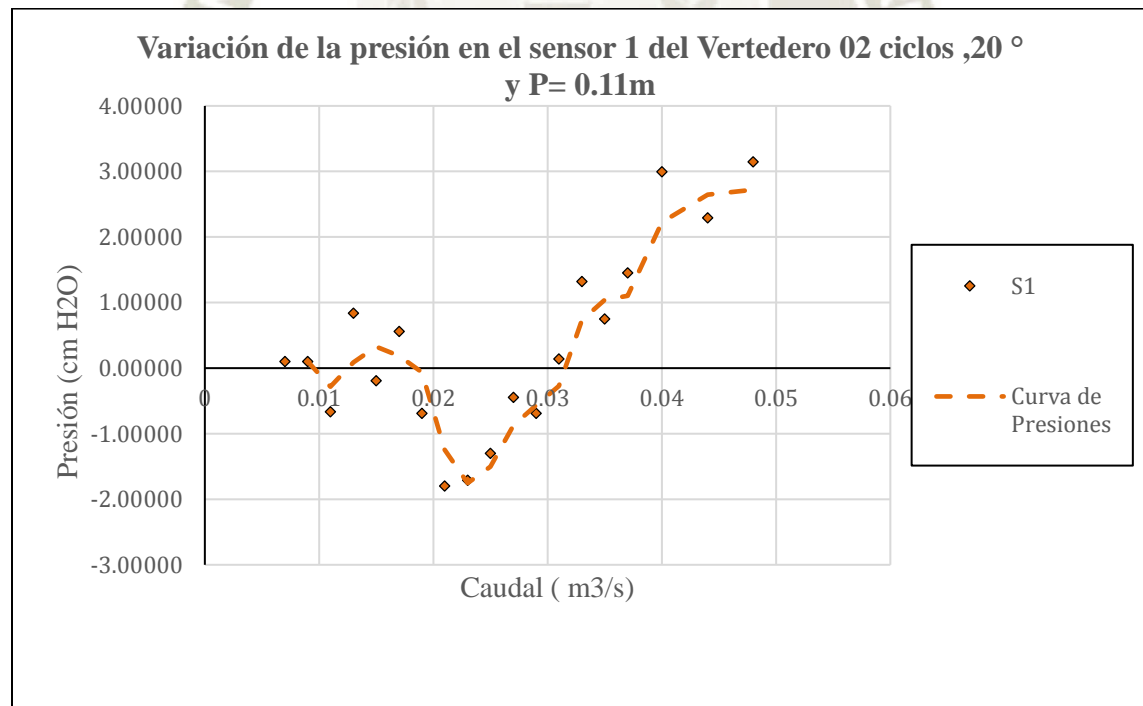


Figura 104. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

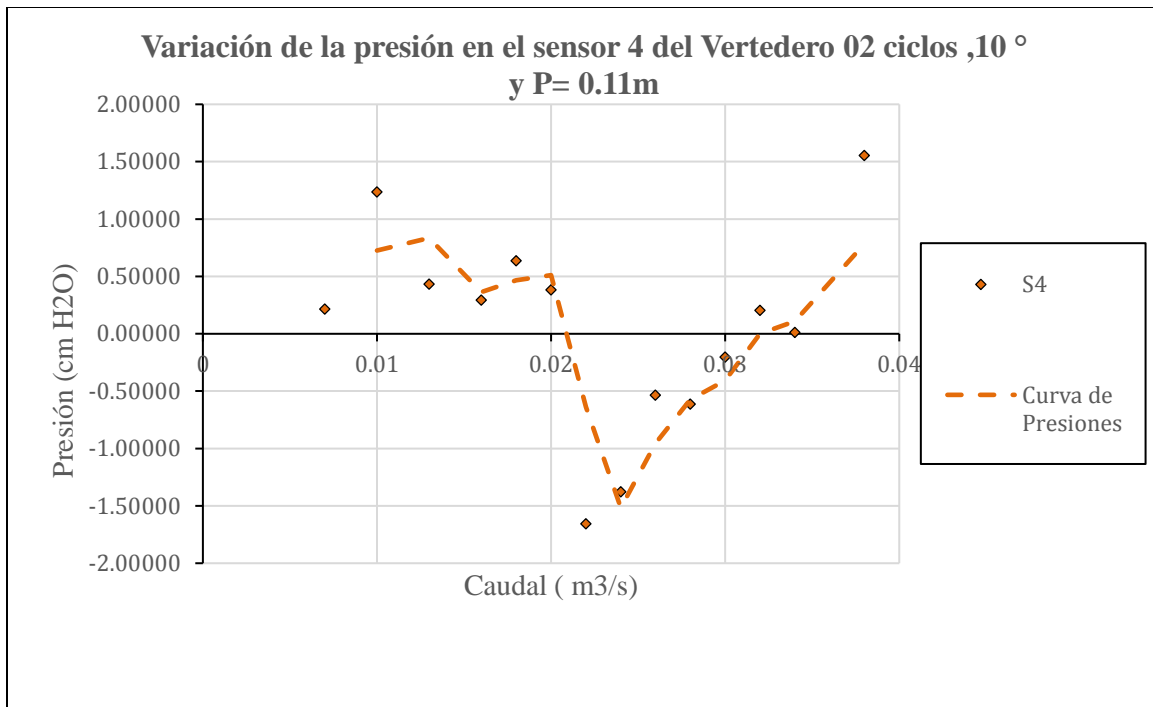


Figura 105. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos, 10 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

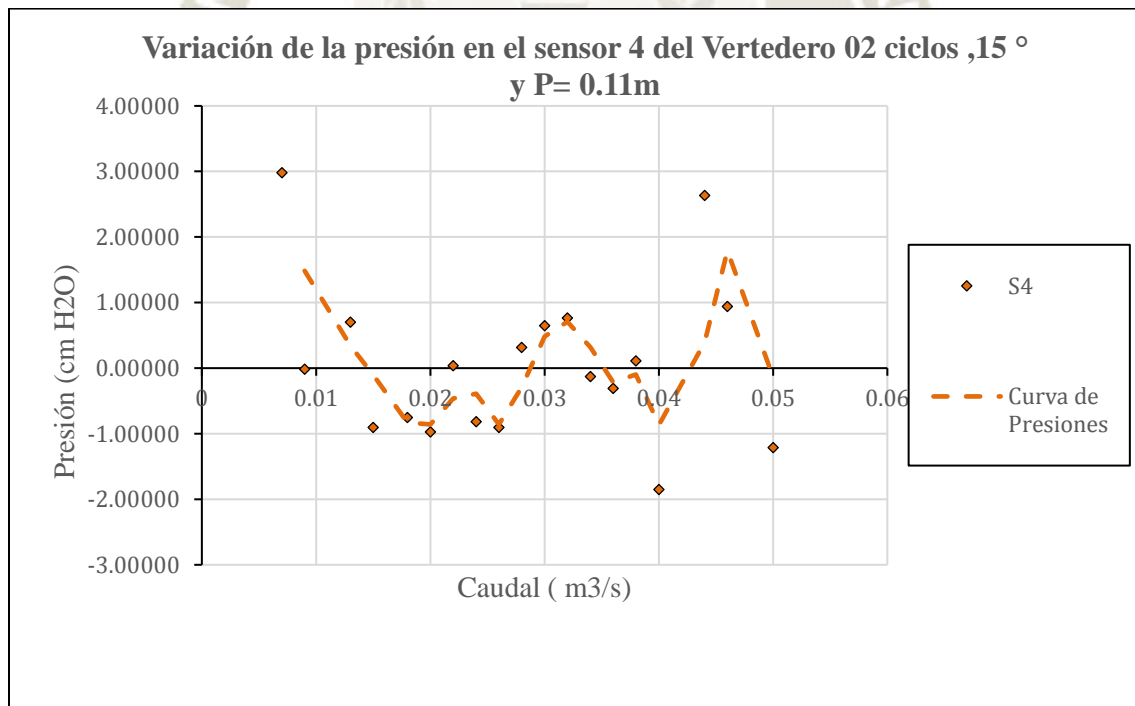


Figura 106. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

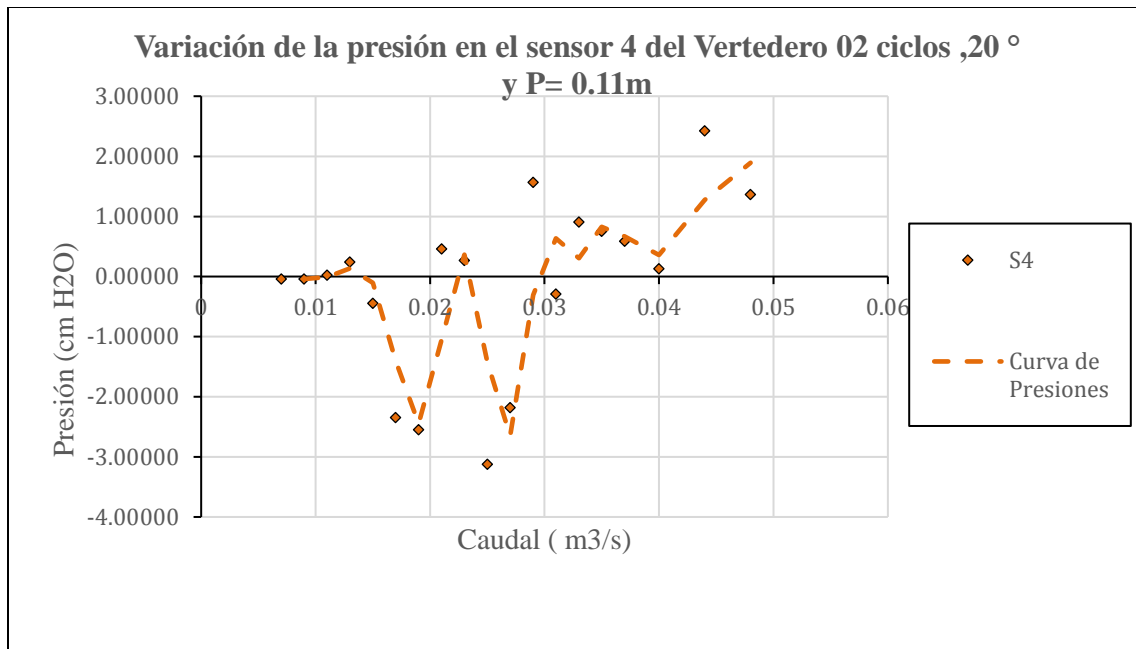


Figura 107. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

Sensor 5.- Ubicado delante del ápice del ciclo de la derecha la altura de la base del canal aguas abajo del vertedero.

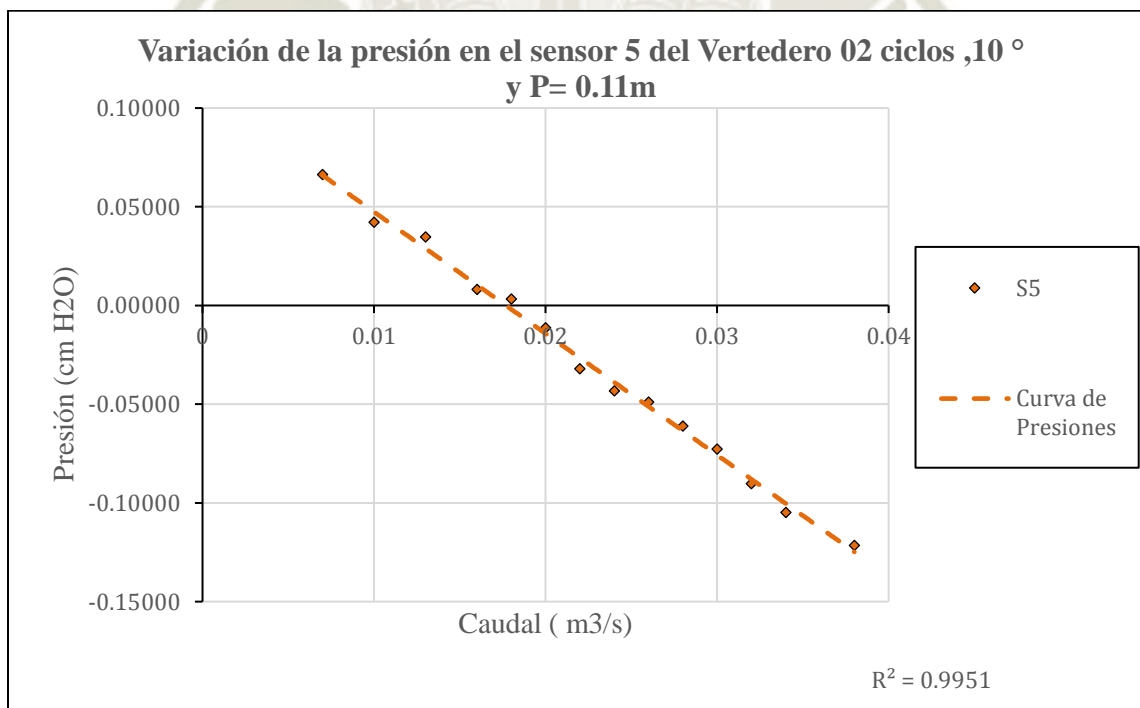
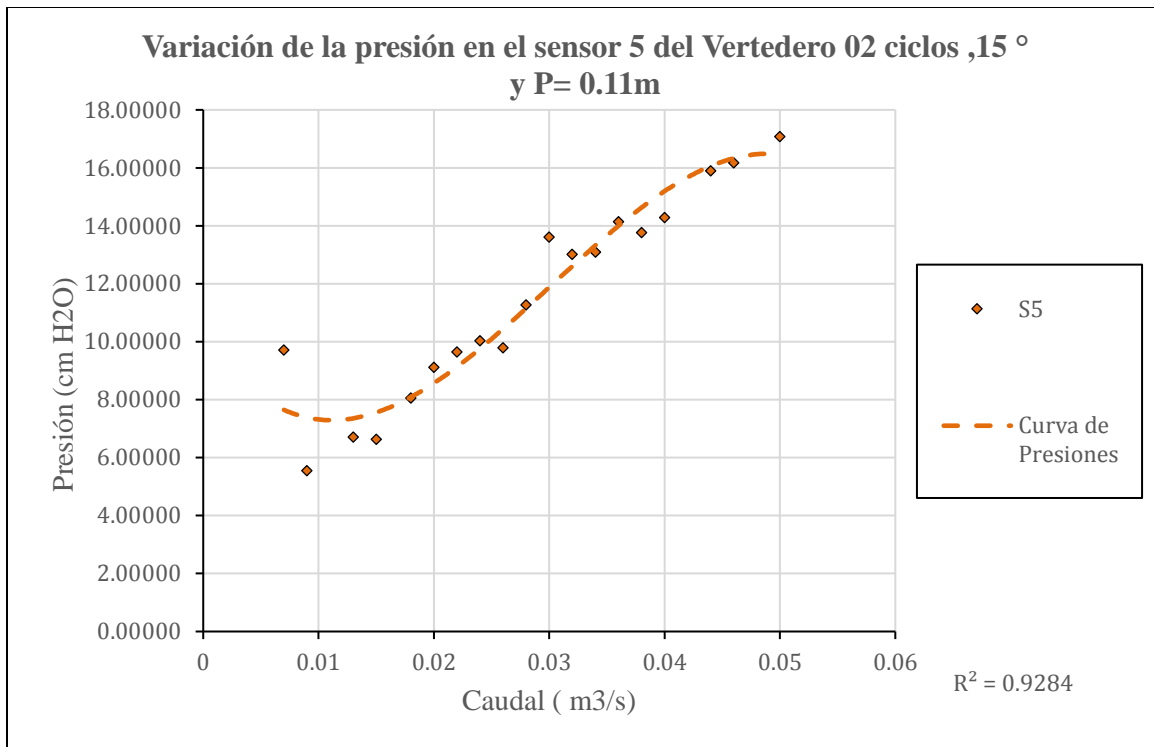
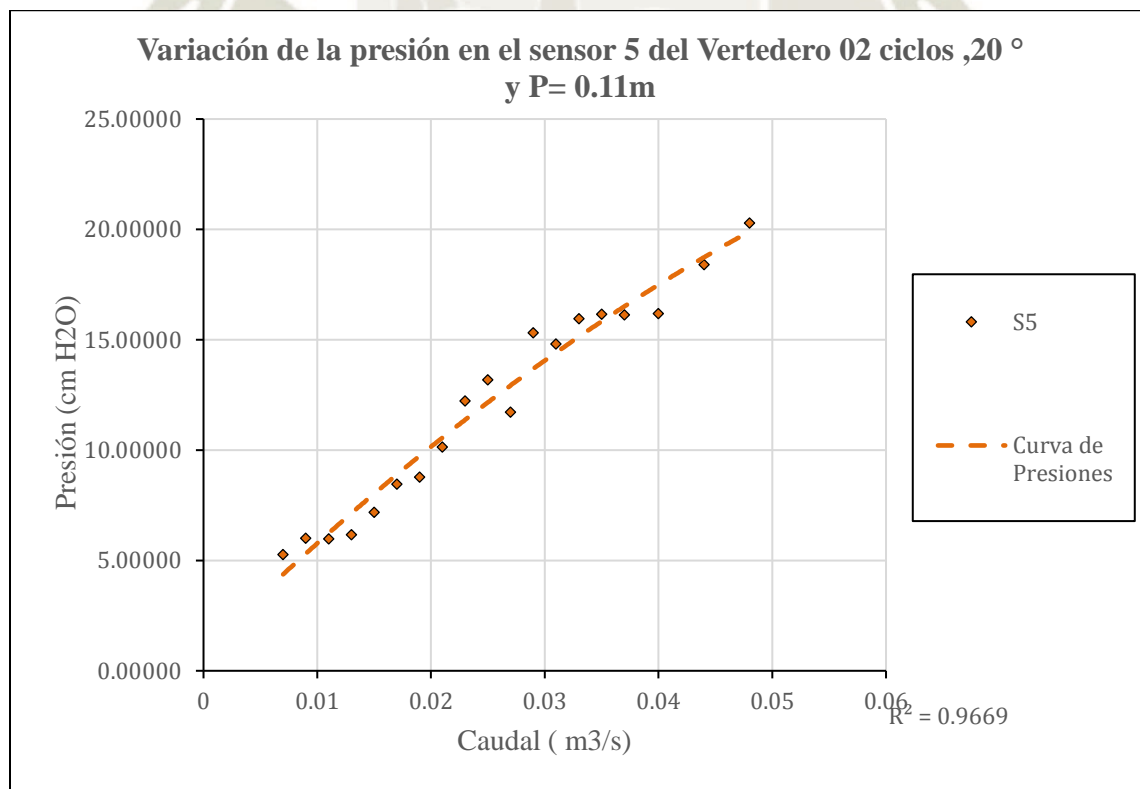


Figura 108. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 10 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia



*Figura 109. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 110. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 02 ciclos, 20 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia*

Sensor 7 y 8.- Ubicados por detrás de los ápices de los vertederos en ambos ciclos, aguas arriba del vertedero a la altura de la base del vertedero.

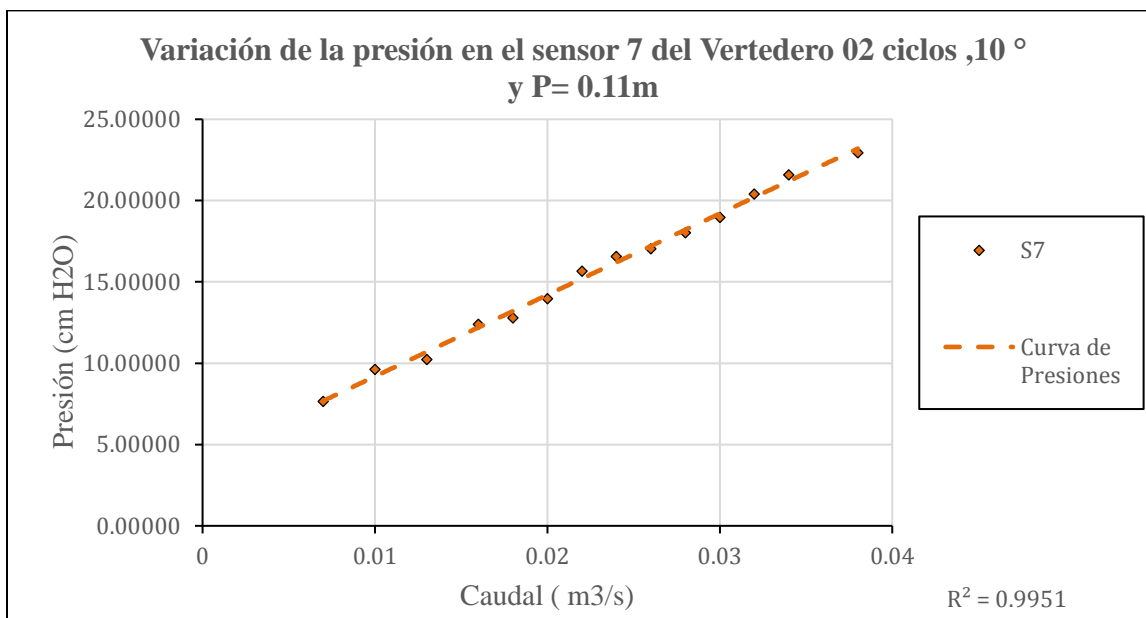


Figura 111. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclo, 10 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

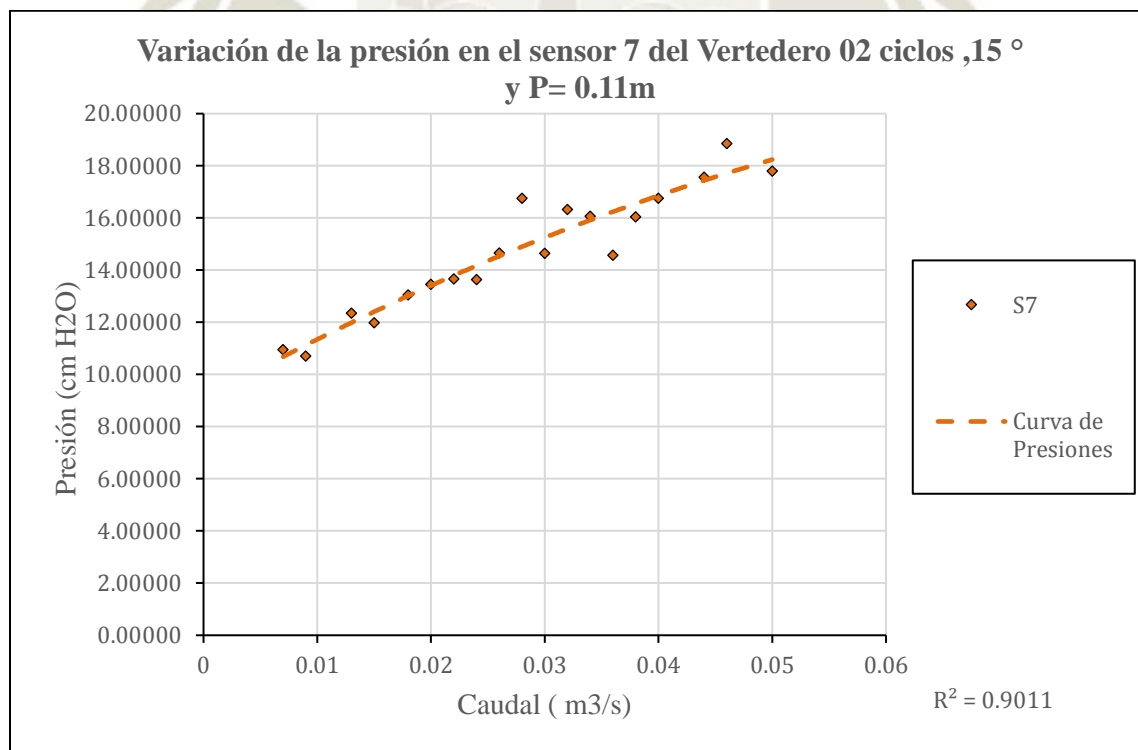


Figura 112. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

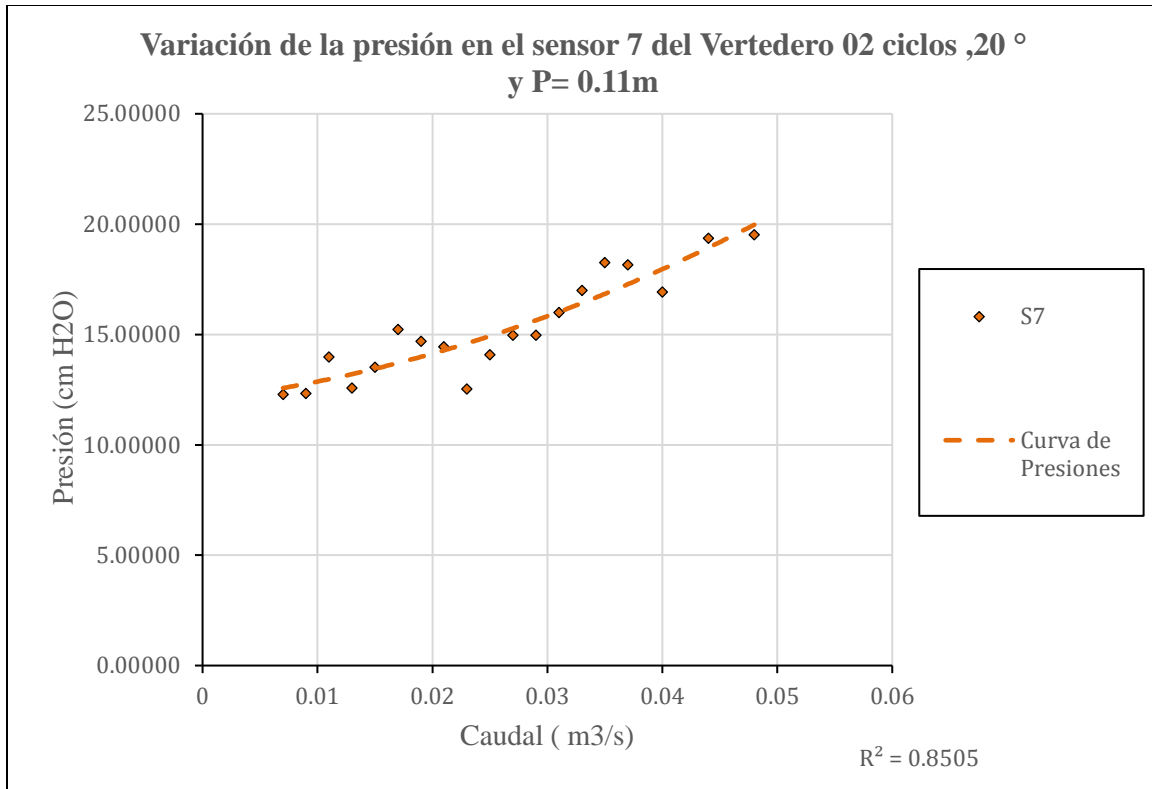


Figura 113. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

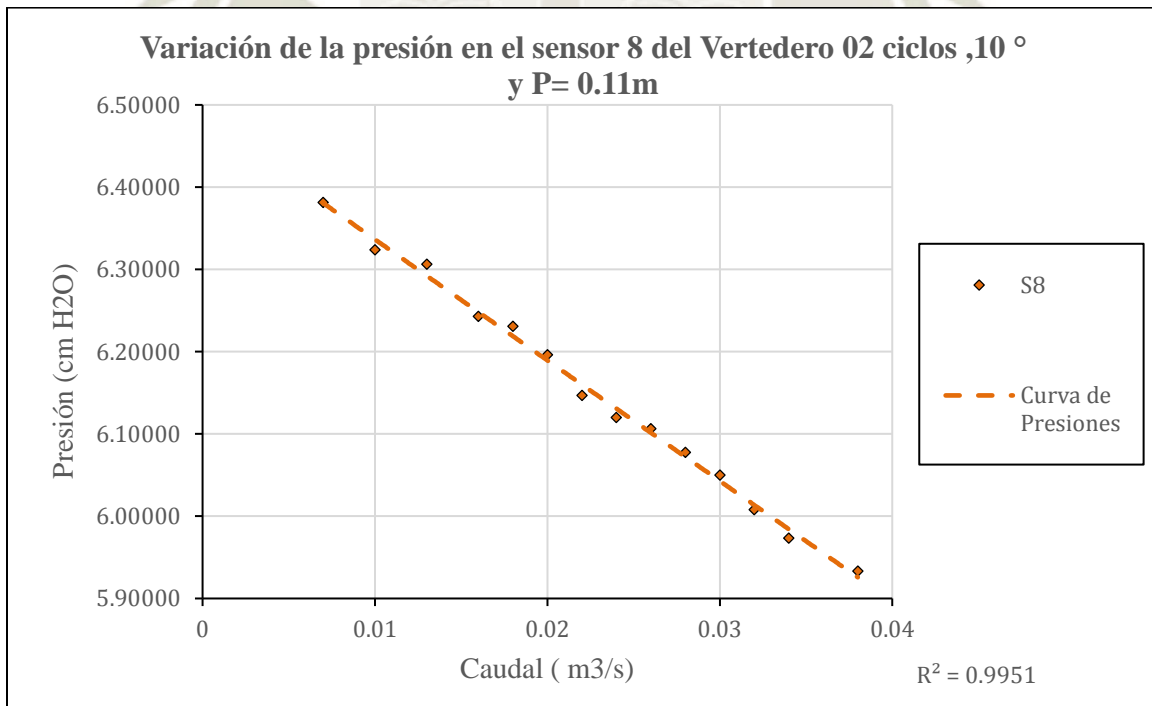


Figura 114. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,10 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

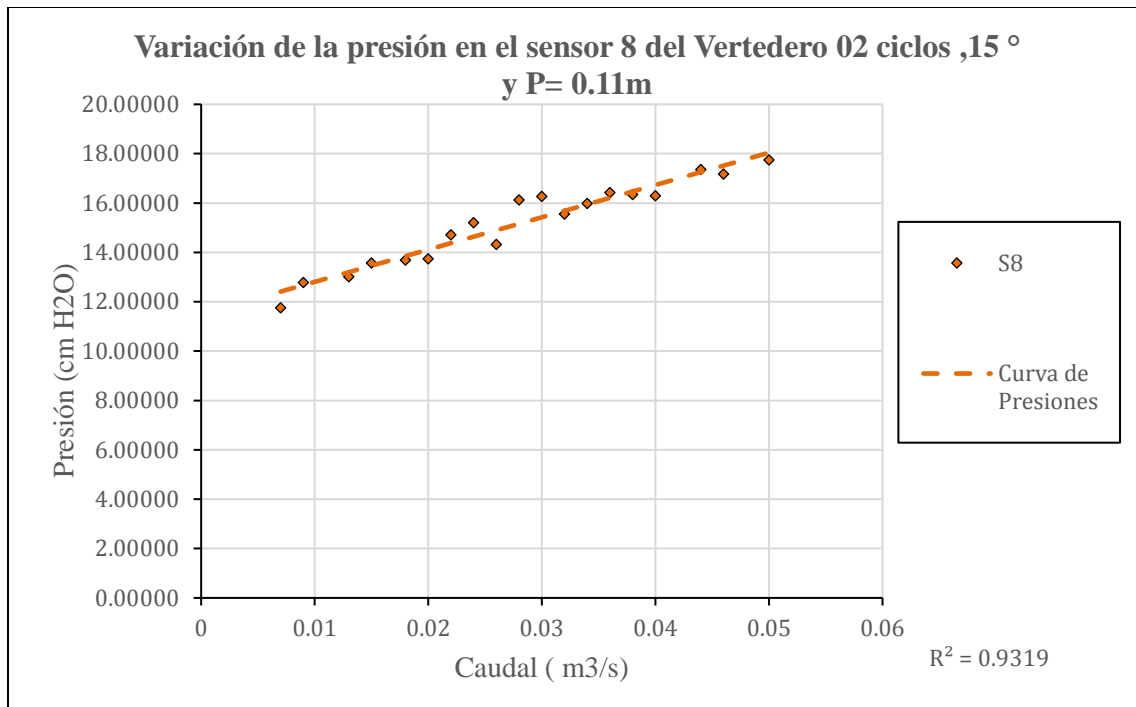


Figura 115. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,15 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

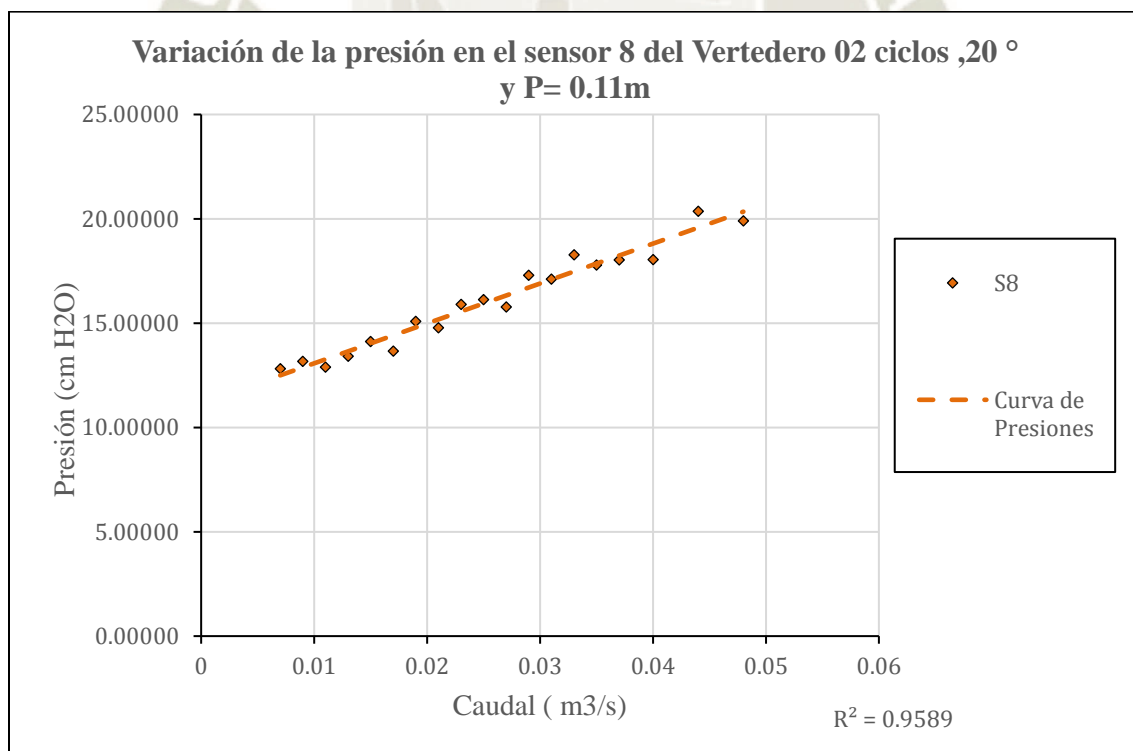


Figura 116. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 02 ciclos ,20 ° y P= 0.11m)
Fuente: Elaboración propia

La figura 117 muestra los puntos distribuidos en los vertederos de 03 ciclos y $P = 0.075\text{ m}$

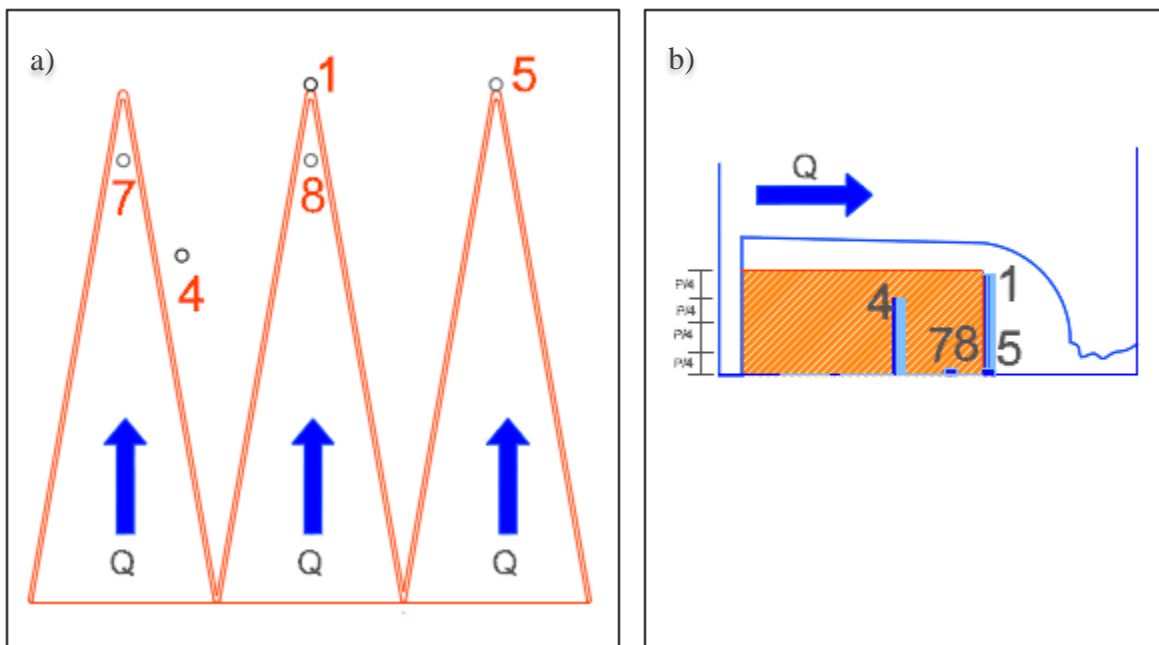


Figura 117. Puntos de toma de presiones en vertederos de 03 ciclos $P = 0.075\text{ m}$
Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Datos de presiones obtenidas para vertederos de 03 ciclos y $P = 0.11$

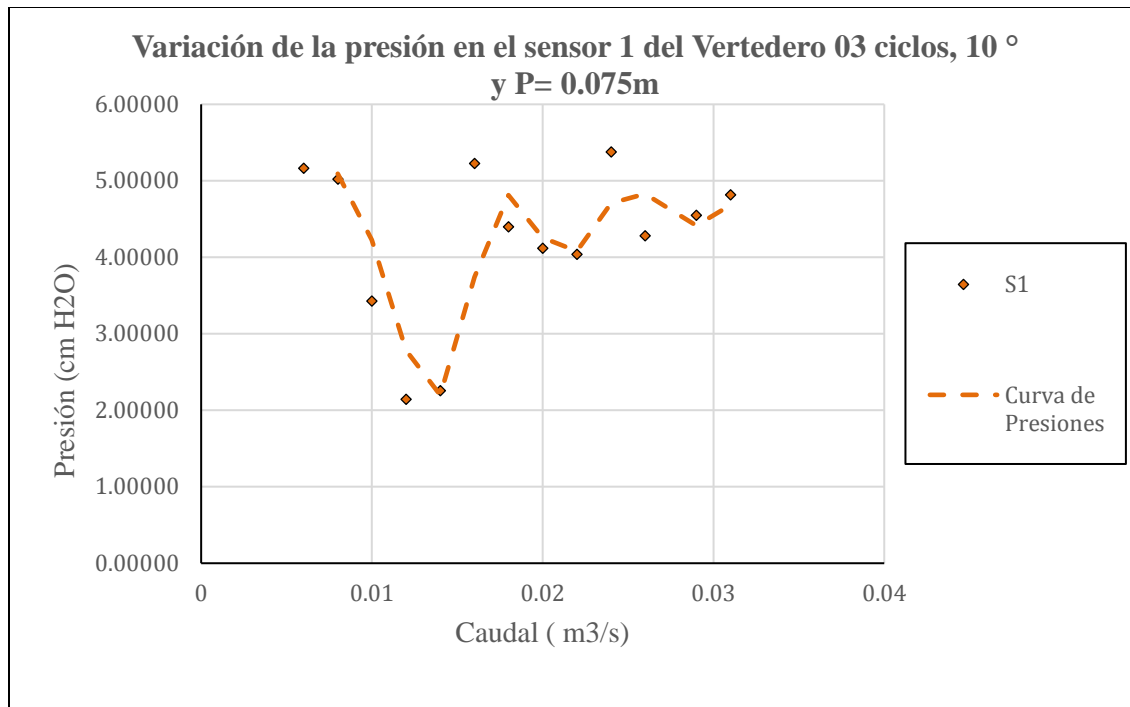
Variación de Presiones en vertederos en laberinto de 03 ciclos, $P = 0.075\text{ m}$						
Gados	Caudal	S1	S4	S5	S7	S8
10°	0.00600	5.16231	1.72077	9.02449	8.15773	4.24457
	0.00800	5.02210	1.42760	7.43118	9.30491	4.84365
	0.01000	3.42880	2.94443	8.47639	9.57259	5.48097
	0.01200	2.14140	3.56901	9.06273	9.50885	5.78689
	0.01400	2.25612	-0.82852	8.80780	8.68033	5.93985
	0.01600	5.22605	1.33838	9.75104	9.21569	7.34196
	0.01800	4.39753	0.34415	10.08244	10.36287	7.97928
	0.02000	4.11710	0.61183	10.36287	10.85998	8.74407
	0.02200	4.04063	0.73929	9.76378	10.85998	8.76956
	0.02400	5.37900	1.88647	10.92371	11.63751	9.53435
	0.02600	4.28281	-0.43338	12.66997	9.70005	9.52160
	0.02900	4.55048	3.12288	12.12188	10.97470	9.33040
0.03100	4.81816	2.95718	13.42201	12.75920	11.89244	
15°	0.00700	0.52260	0.54810	11.79047	6.20752	6.93407
	0.01000	1.65704	1.91197	11.45906	6.93407	5.11133

	0.01200	3.03366	1.83549	12.37681	7.29097	6.29675
	0.01400	-0.14021	1.70802	12.47878	7.34196	5.90161
	0.01600	1.05796	1.78450	12.68272	7.82632	6.50069
	0.01800	3.47978	-1.03246	13.74068	8.36167	8.51463
	0.02000	2.38359	-0.11472	13.85539	8.42541	9.53435
	0.02200	2.81697	-0.25493	14.05934	8.85878	9.59808
	0.02500	1.35112	1.59331	14.60743	9.07547	9.98047
	0.02800	2.62577	-0.39514	15.13004	9.70005	11.53554
20°	0.00600	4.35929	3.93865	9.59808	10.70702	5.93985
	0.00800	4.38478	4.18084	9.59808	10.93646	7.36745
	0.01000	4.46126	2.94443	9.76378	12.07089	7.36745
	0.01200	-0.35690	3.27584	10.40111	11.77772	7.77534
	0.01400	1.47859	1.60605	10.41385	12.01990	8.18322
	0.01600	2.58753	2.86795	10.94920	12.35131	8.80780
	0.01800	1.23641	3.40330	11.93068	13.25631	10.85998
	0.02000	-0.53535	4.86914	11.93068	13.25631	11.00019
	0.02300	6.66639	3.63274	13.37103	14.90060	11.85420
	0.02500	3.352317	4.5887229	13.715183	15.550672	13.320043

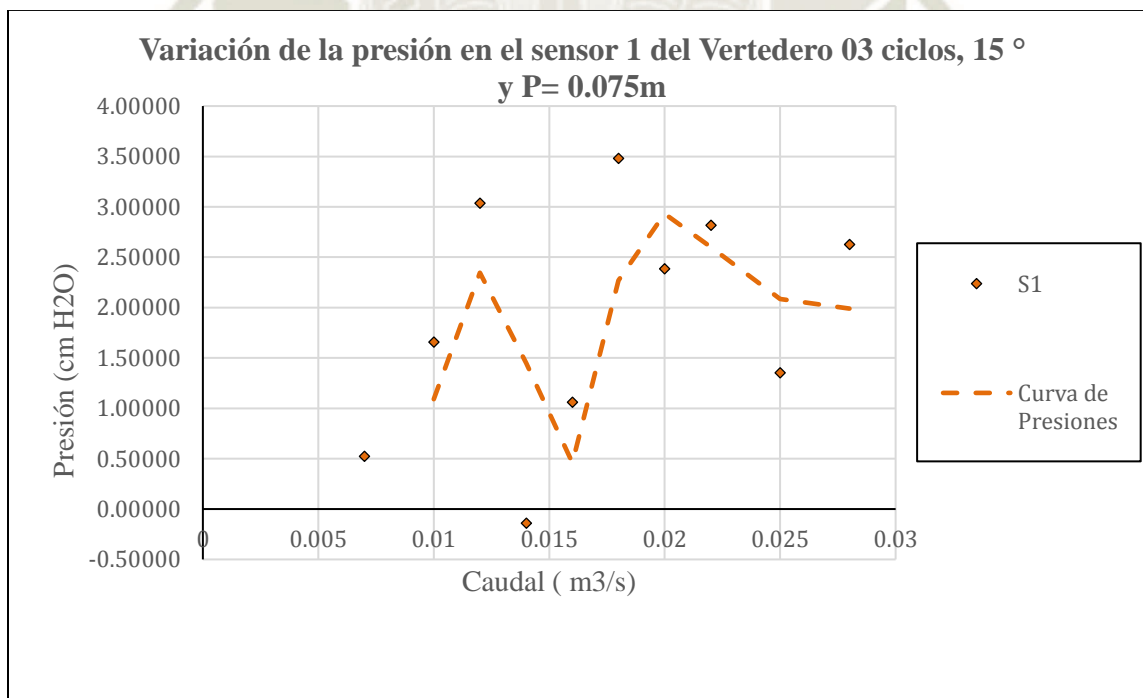
Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de dispersión muestran la variación de presiones, en puntos ubicados en posiciones semejantes de los vertederos de 10°, 15° y 20°; de 03 ciclos y $P= 0.075m$

Los sensores 1 y 4.- Ubicados en la punta de la cresta del vertedero de 01 ciclo y $P= 0.075m$. y en la pared lateral a una misma altura de la cresta respectivamente.



*Figura 118. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 119. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*

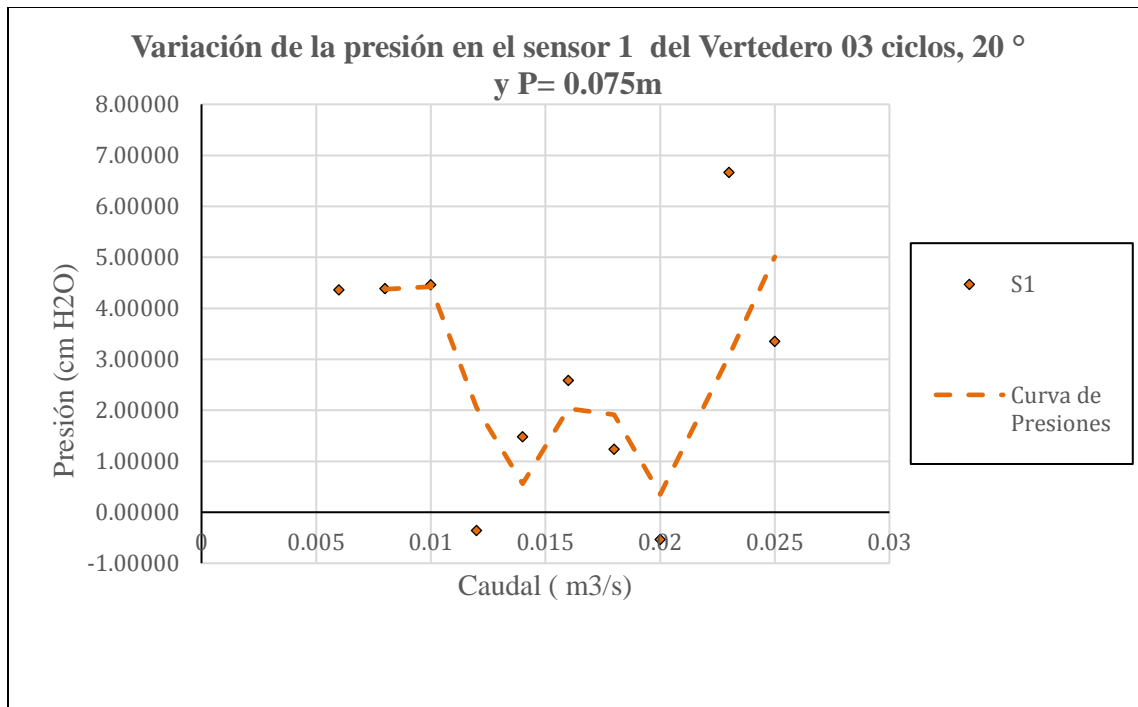


Figura 120. Curva de presión para el sensor 1 (Vertedero 03 ciclos ,20 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

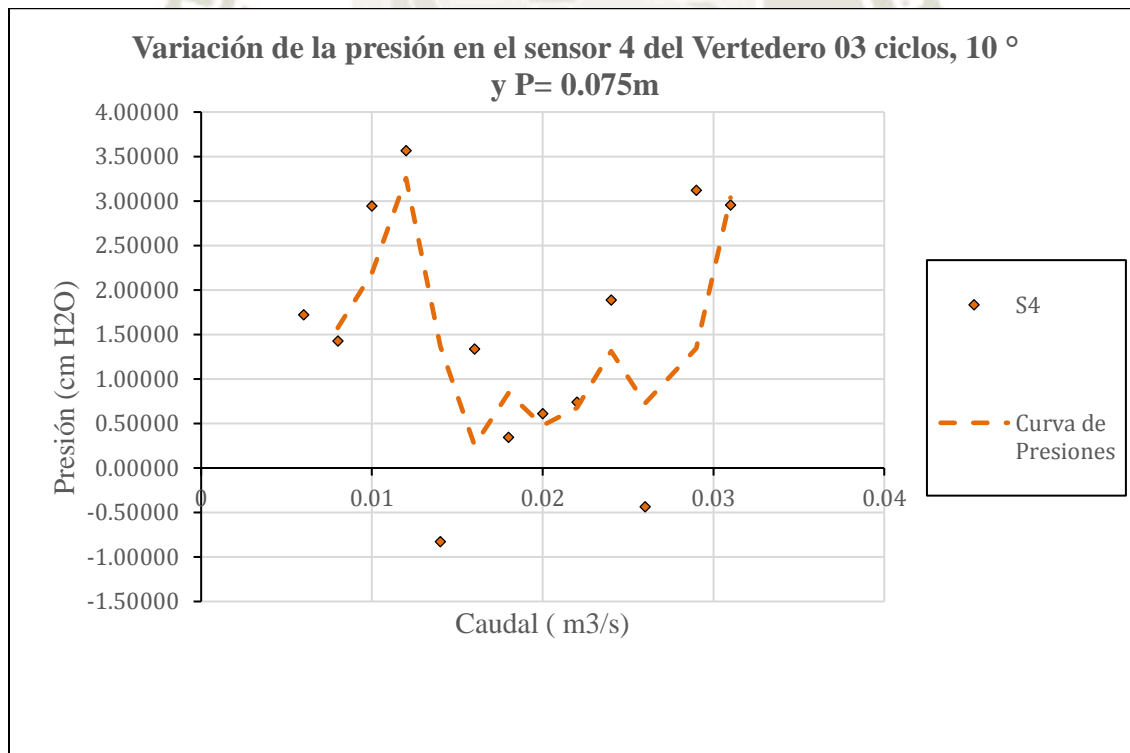


Figura 121. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

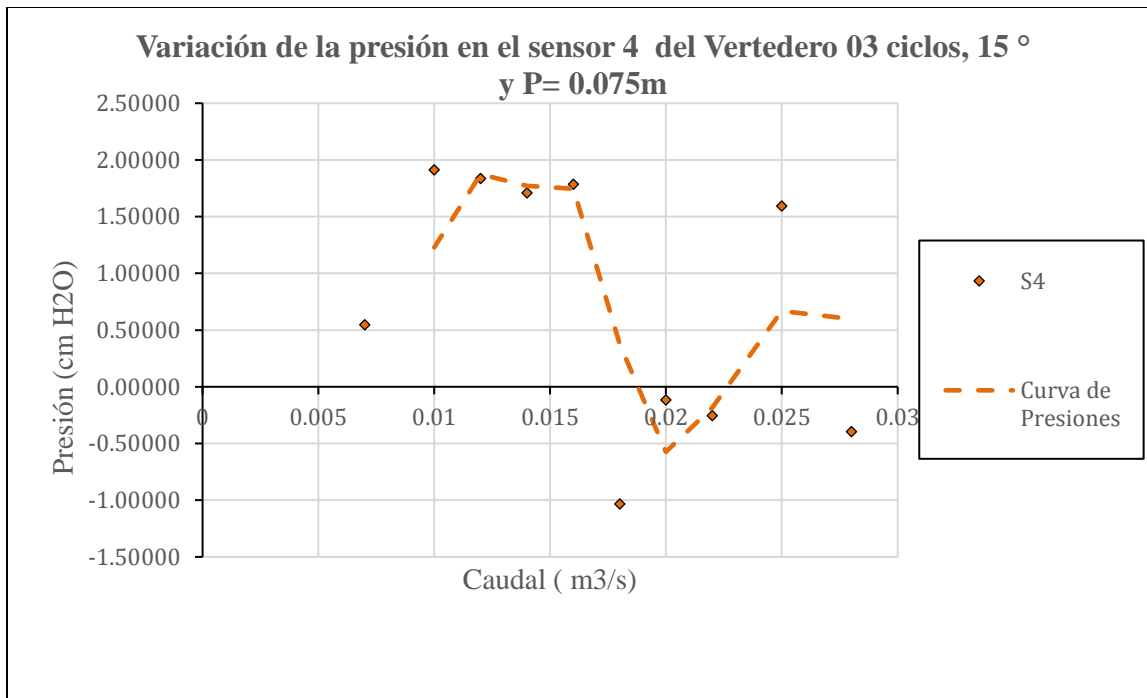


Figura 122. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

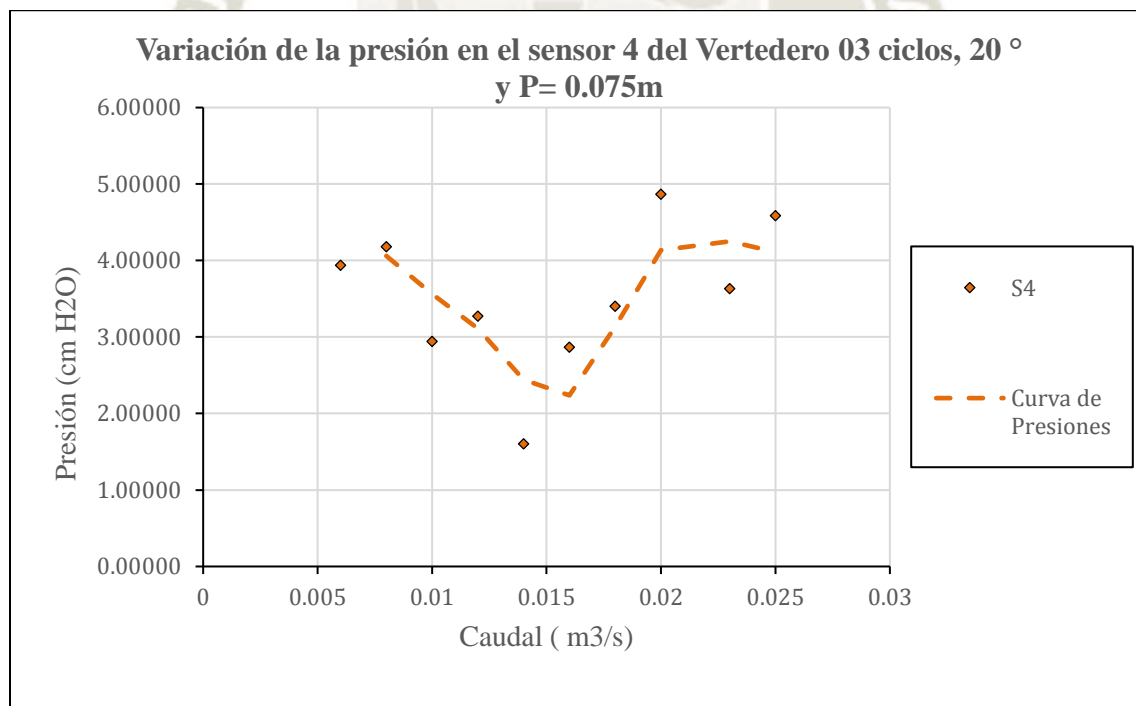


Figura 123. Curva de presión para el sensor 4 (Vertedero 03 ciclos ,20 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

Sensor 5.- Ubicado delante del ápice del ciclo de la derecha la altura de la base del canal aguas abajo del vertedero.

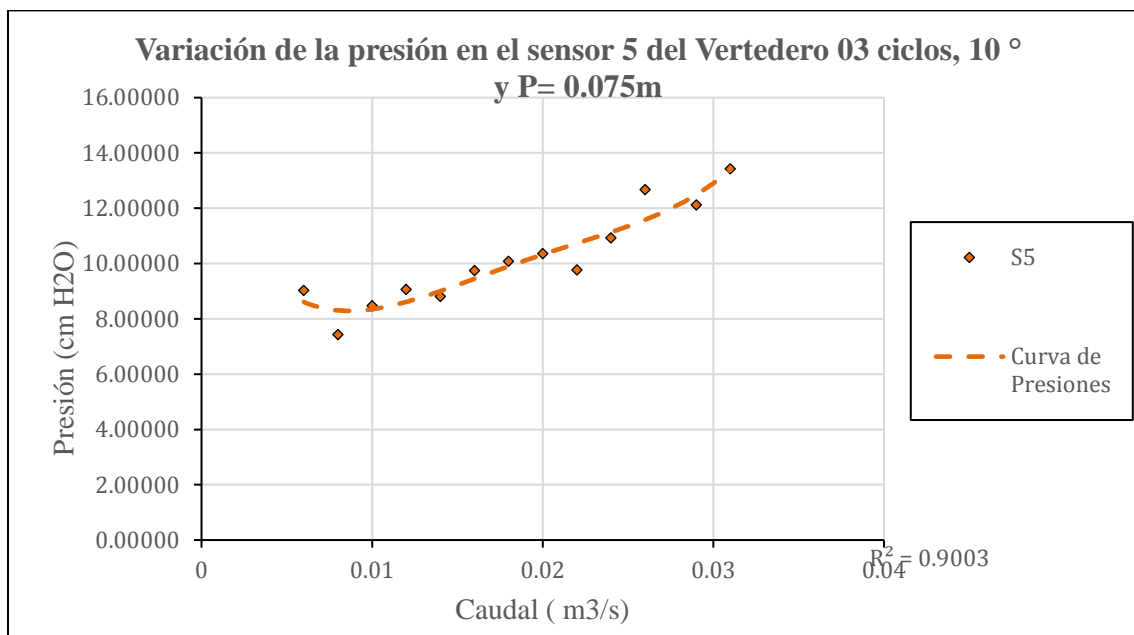


Figura 124. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,10 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

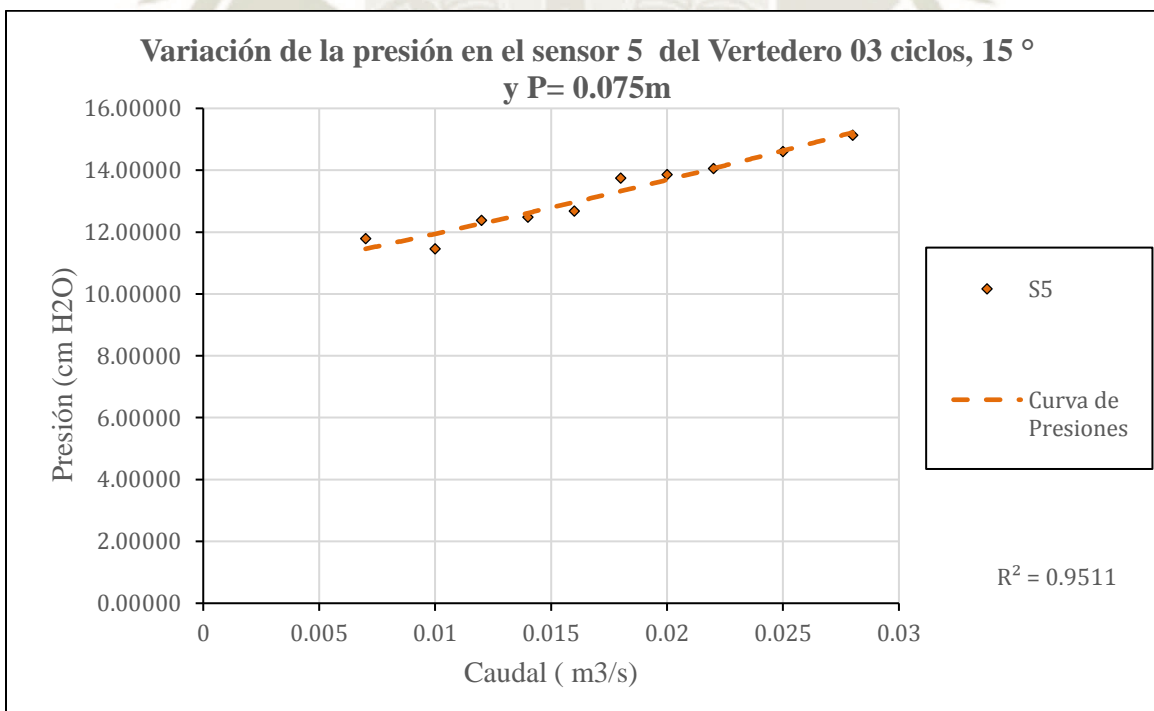
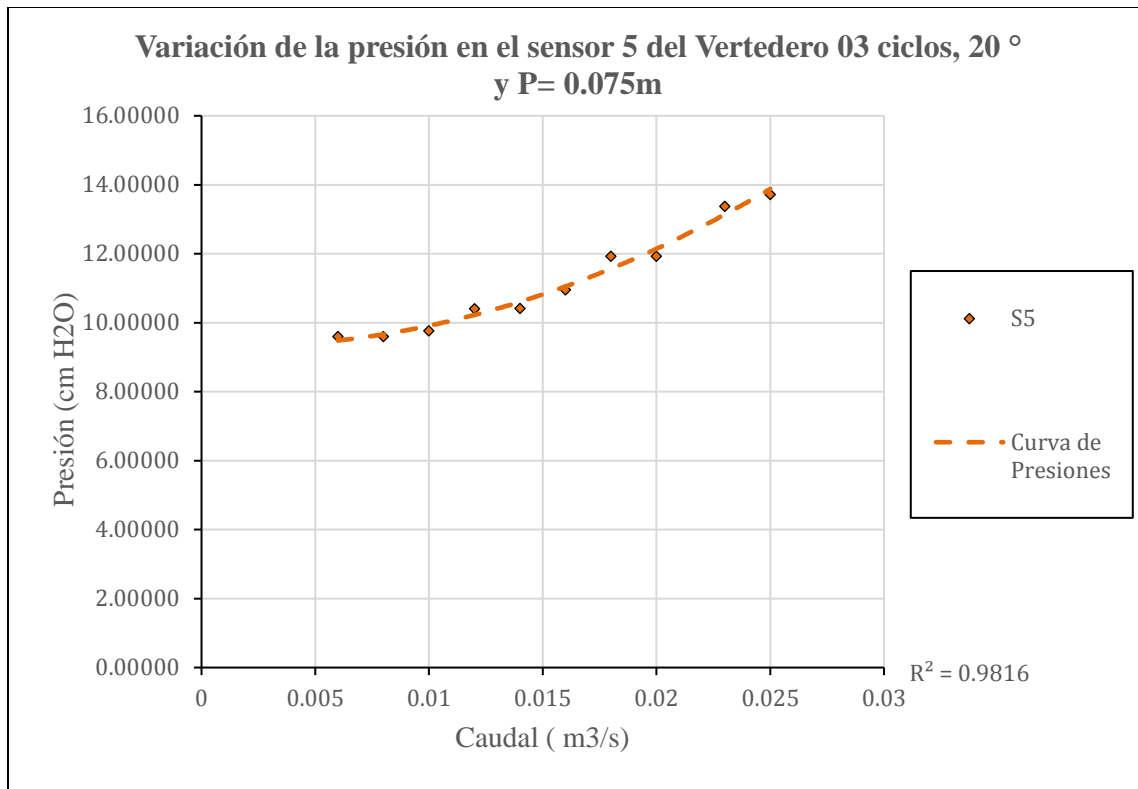
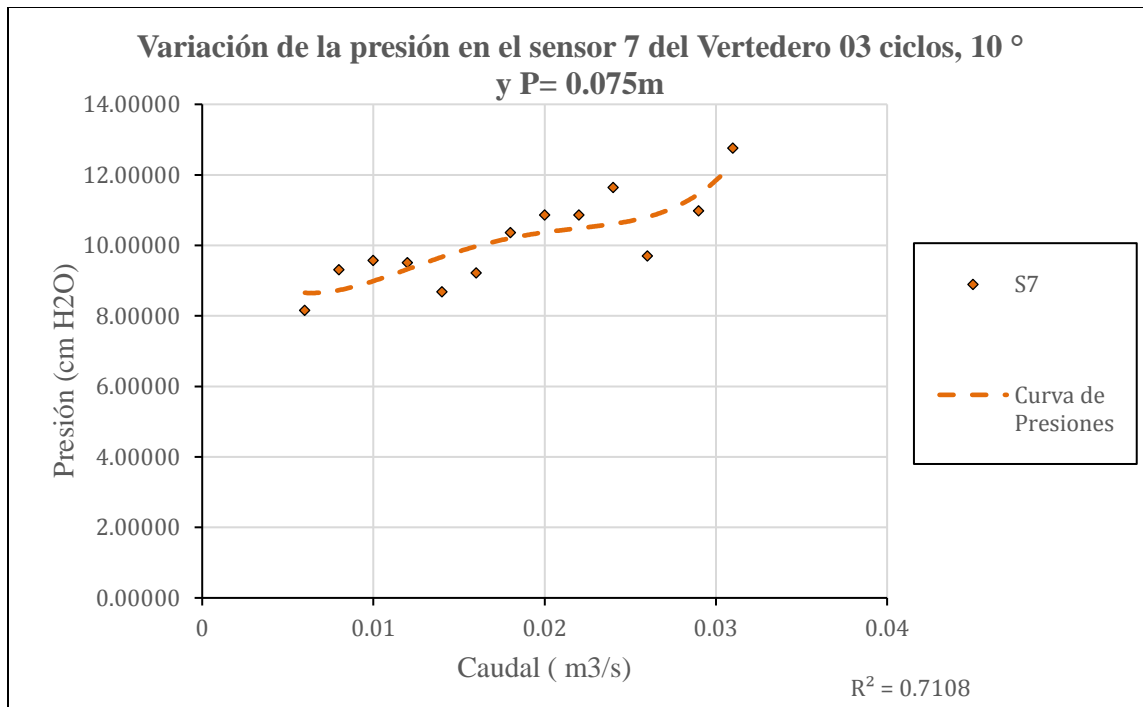


Figura 125. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,15 ° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

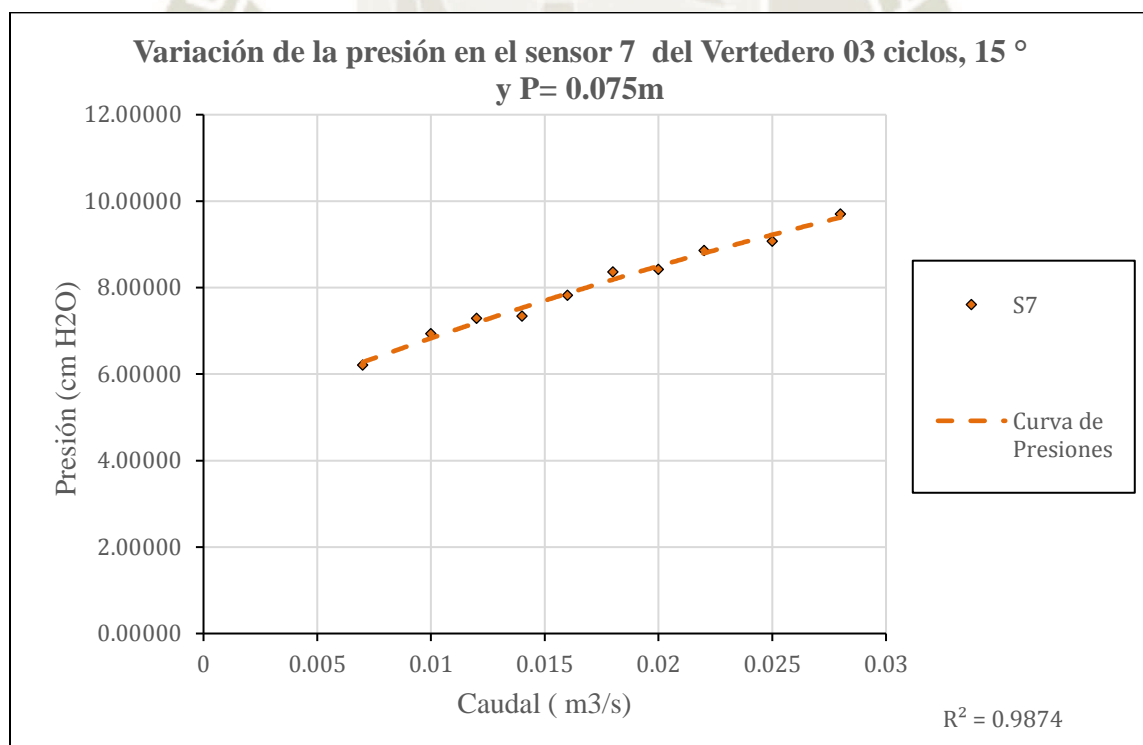


*Figura 126. Curva de presión para el sensor 5 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*

Sensor 7 y 8.- Ubicados por detrás de los ápices del ciclo izquierdo y central del vertedero en laberinto, aguas arriba del vertedero a la altura de la base del vertedero.



*Figura 127. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,10° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 128. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,15° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*

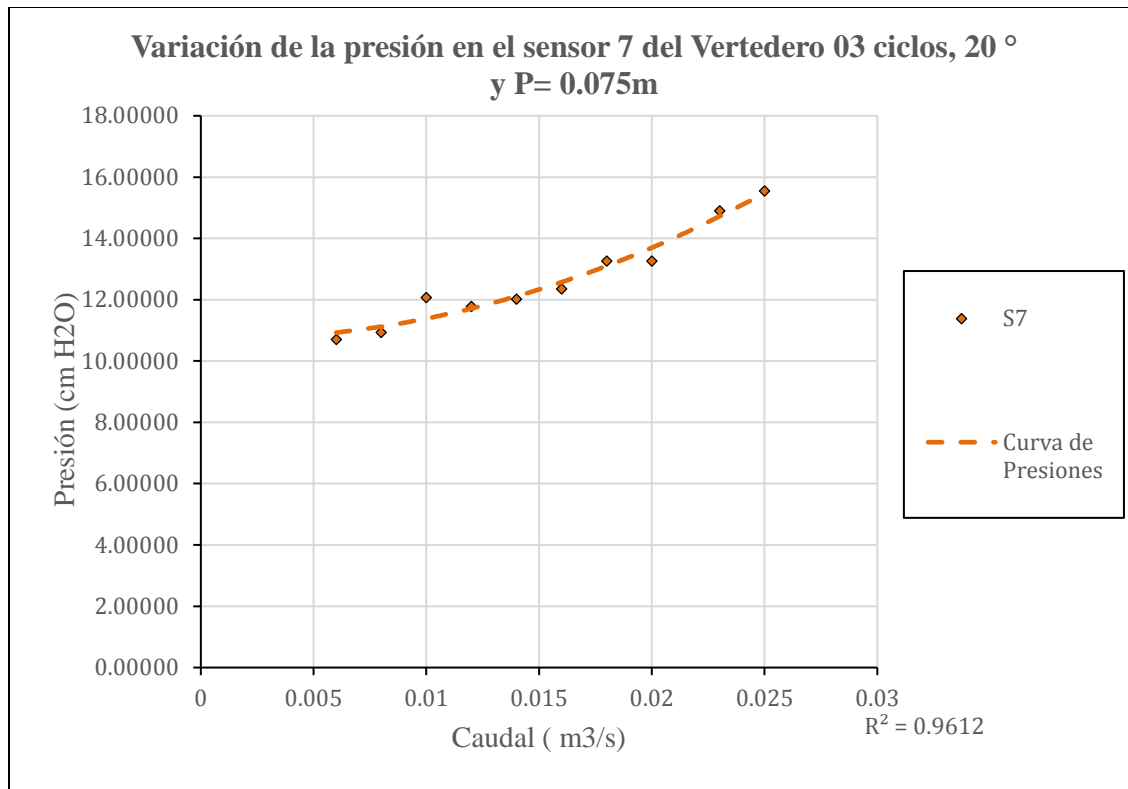


Figura 129. Curva de presión para el sensor 7 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia

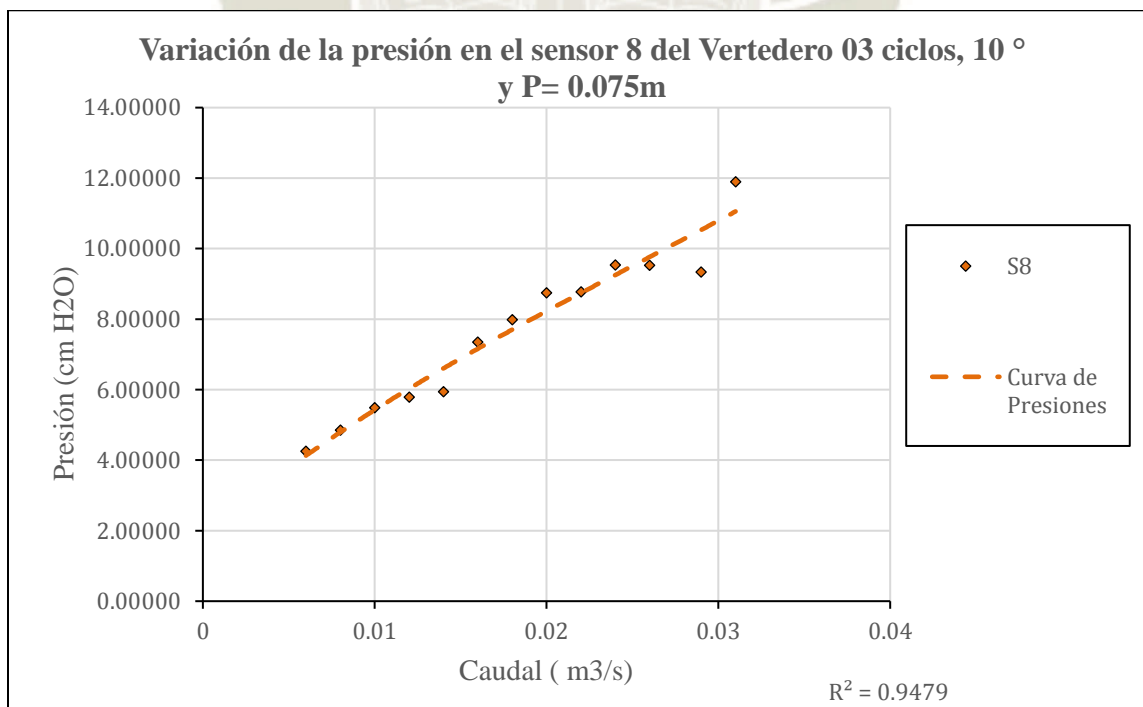
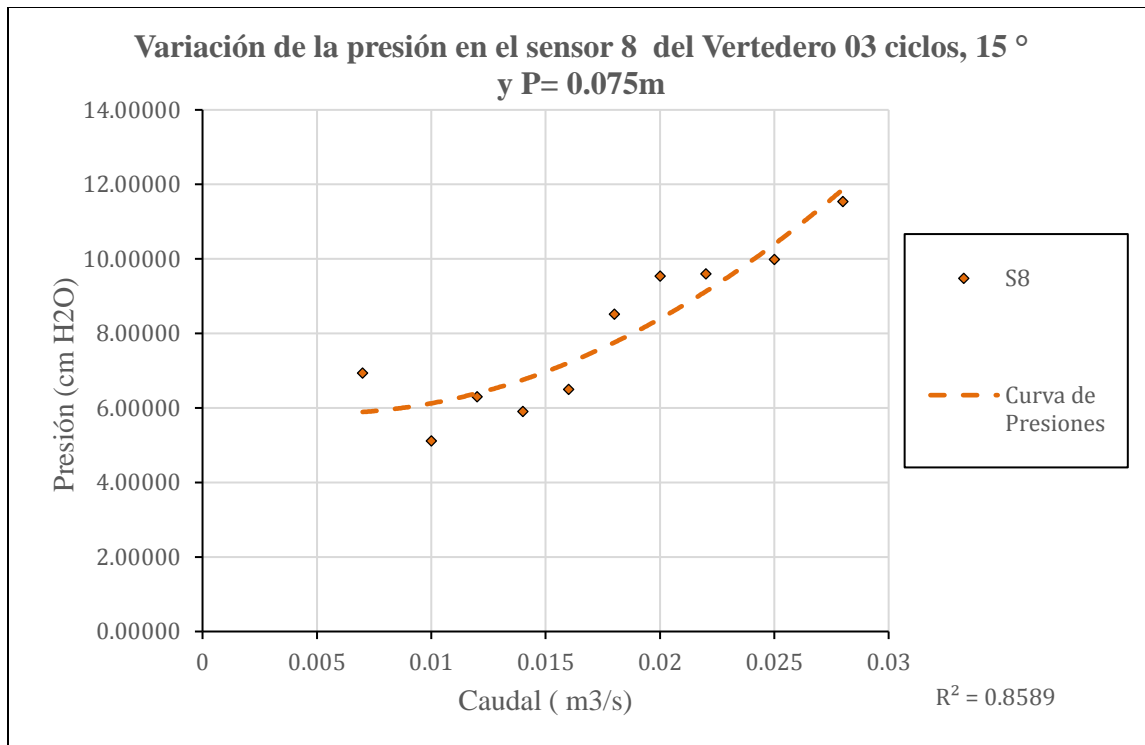
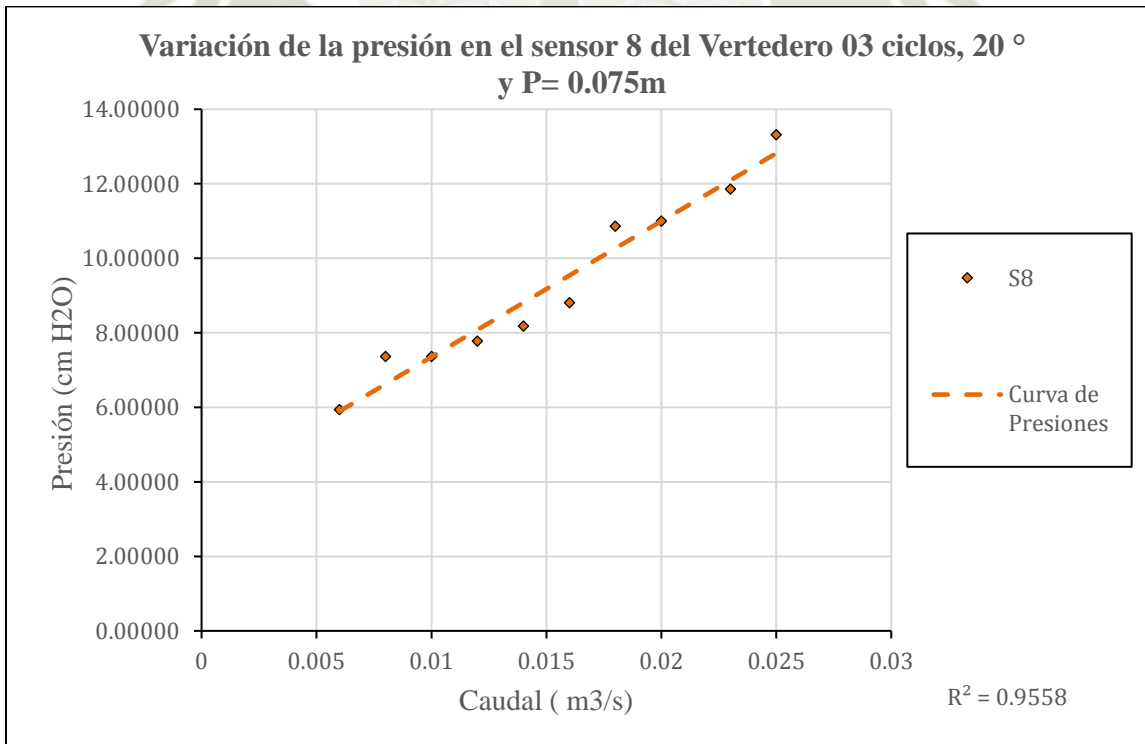


Figura 130. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,10° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia



*Figura 131. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,15° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 132. Curva de presión para el sensor 8 (Vertedero 03 ciclos ,20° y P= 0.075m)
Fuente: Elaboración propia*



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Análisis de Resultados

1.1. Curvas de Gasto H_o/Q

En las figuras 133, 134 y 135 se pueden apreciar las curvas de gasto experimental de los 3 tipos de vertederos en laberinto, clasificados por el número de ciclos y altura de paramentos semejantes, pero con el grado de abertura diferente.

Las gráficas reúnen la información al comparar los caudales descargados por los vertederos y las alturas de carga de agua de cada uno de los modelos.

En las gráficas de los vertederos se puede comprobar que al comparar los caudales descargados hay una tendencia que indica que, para una misma altura de carga de agua por encima del paramento del vertedero, hay una mayor capacidad de descarga, además por semejanza se aprecia que, en los diferentes tipos de vertederos, para un mismo caudal de descarga, hay un incremento en el valor de la carga de agua. Estos resultados son útiles para tenerlos en consideración al momento de evaluar la capacidad del embalse.

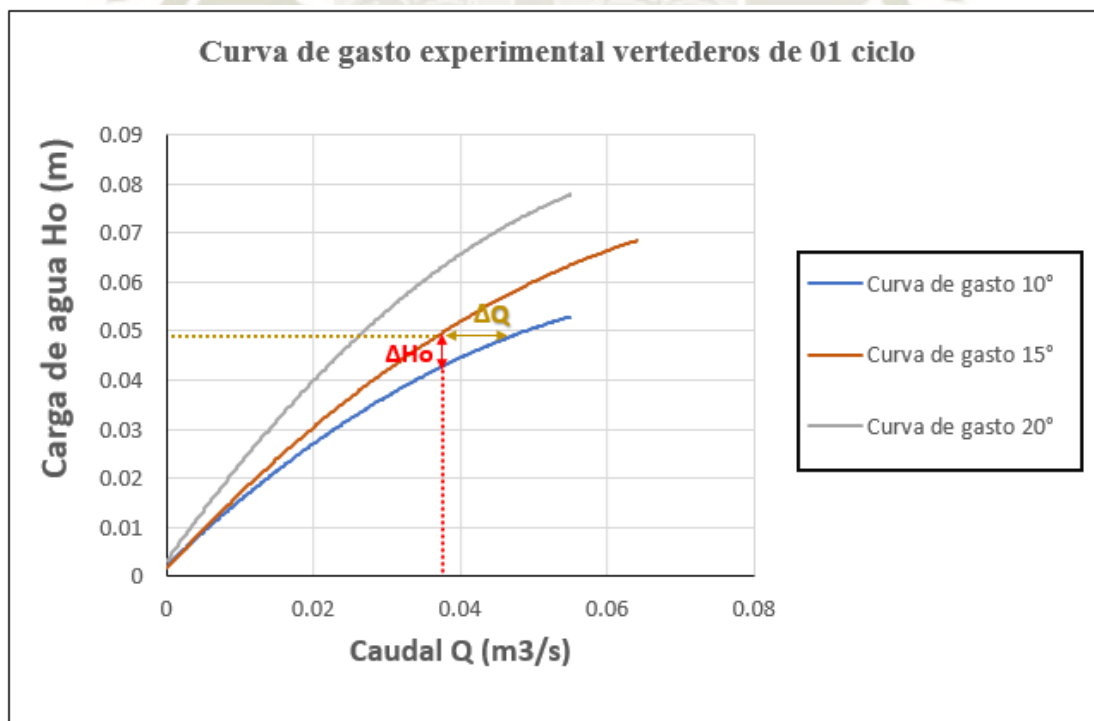


Figura 133. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo $P=.0185m$.
Fuente: Elaboración propia

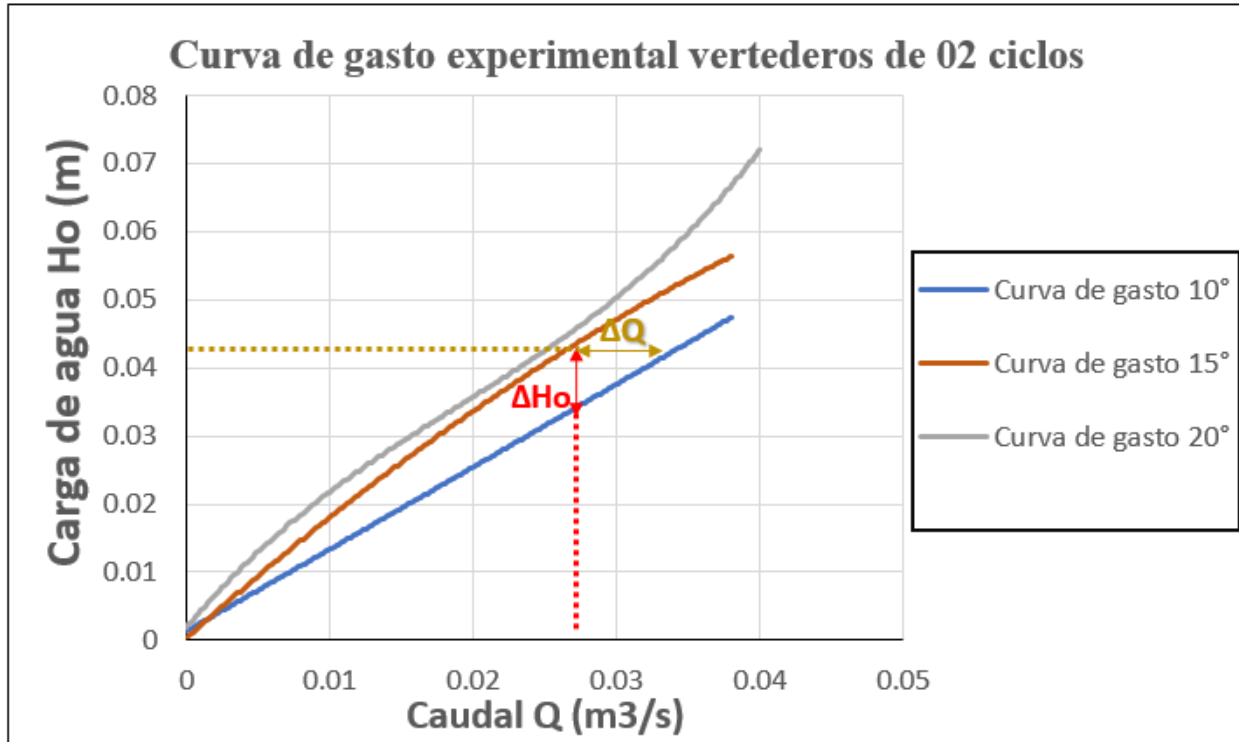


Figura 134. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo $P=0.185m$.
Fuente: Elaboración propia

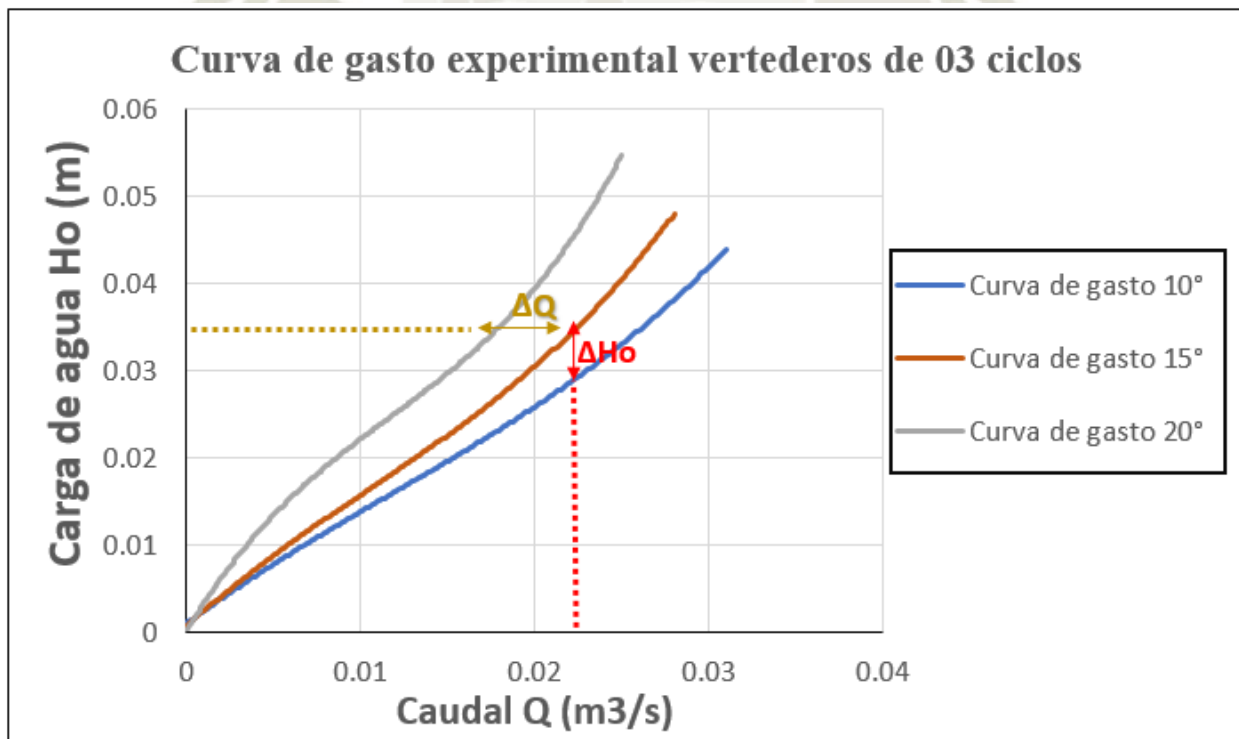


Figura 135. Curvas de gasto experimental en vertederos de 01 ciclo $P=0.185m$.
Fuente: Elaboración propia

1.2. Curvas de diseño para gasto $\left(C_d / H_0 / P \right)$

Partiendo de la ecuación general de vertederos $\left(Q = C_d \cdot L \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{1.5} \right)$, se despejó el coeficiente de descarga de todos los modelos, para que éste quede en función de la longitud efectiva de la cresta del aliviadero. Además, se halló el ratio de la altura de carga hidráulica sobre el vertedero y la altura del paramento $\left(H_0 / P \right)$; por último se realizaron las gráficas de comparación de resultados $(C_d \text{ vs } H_0 / P)$, obteniendo así la curva de diseño de gasto para cada modelo. En las tablas anexas podemos observar los datos utilizados en tablas que permiten el diseño de estas curvas.

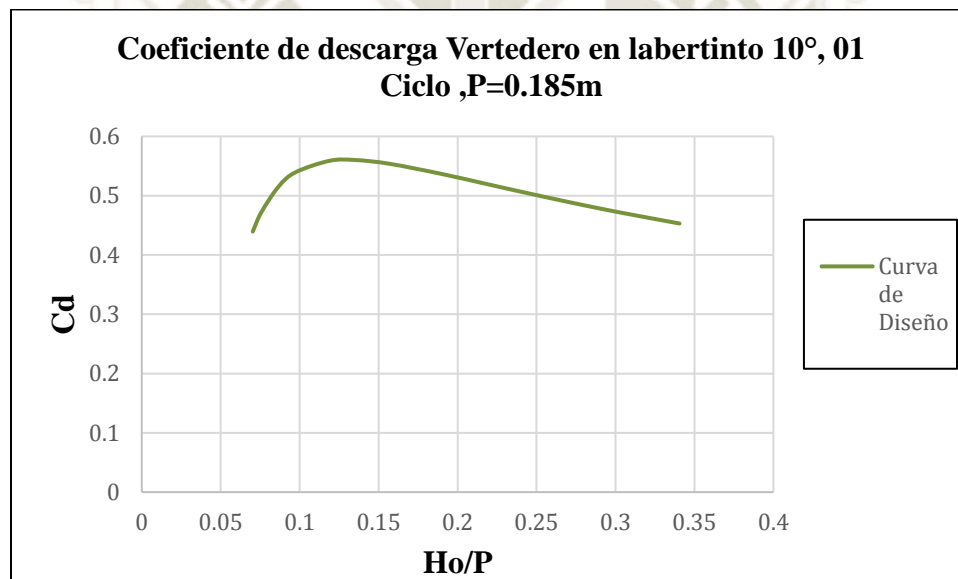


Figura 136. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 01 ciclo, P= 0.185
Fuente: Elaboración Propia

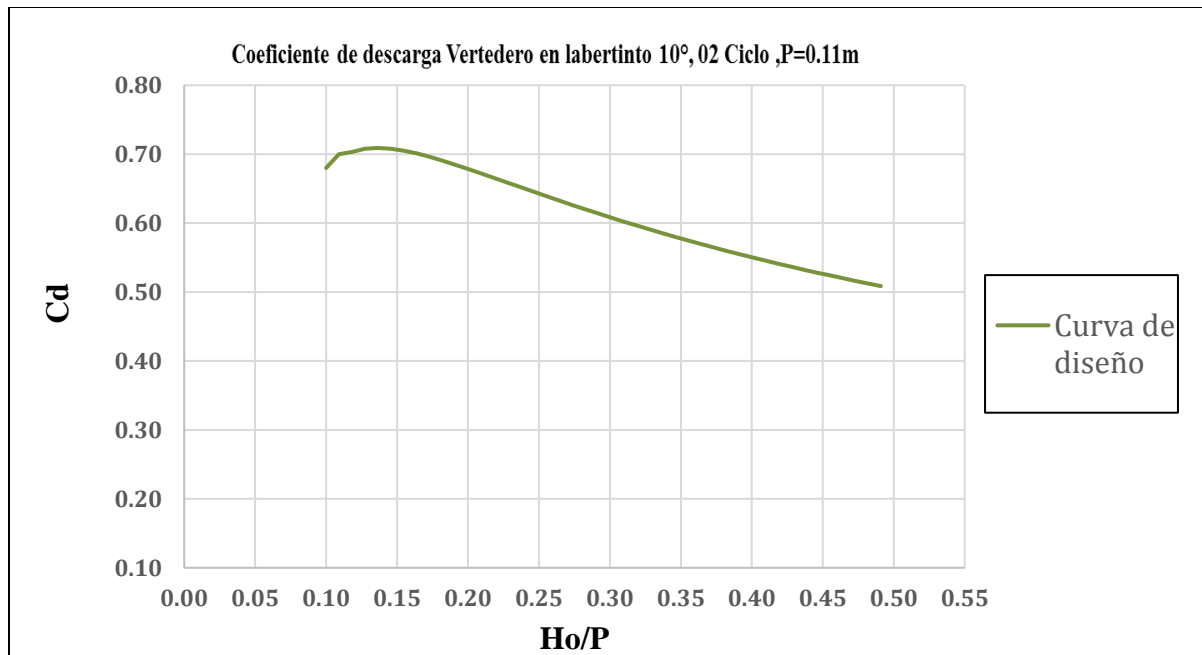


Figura 137. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 02 ciclos, P= 0.11
Fuente: Elaboración Propia

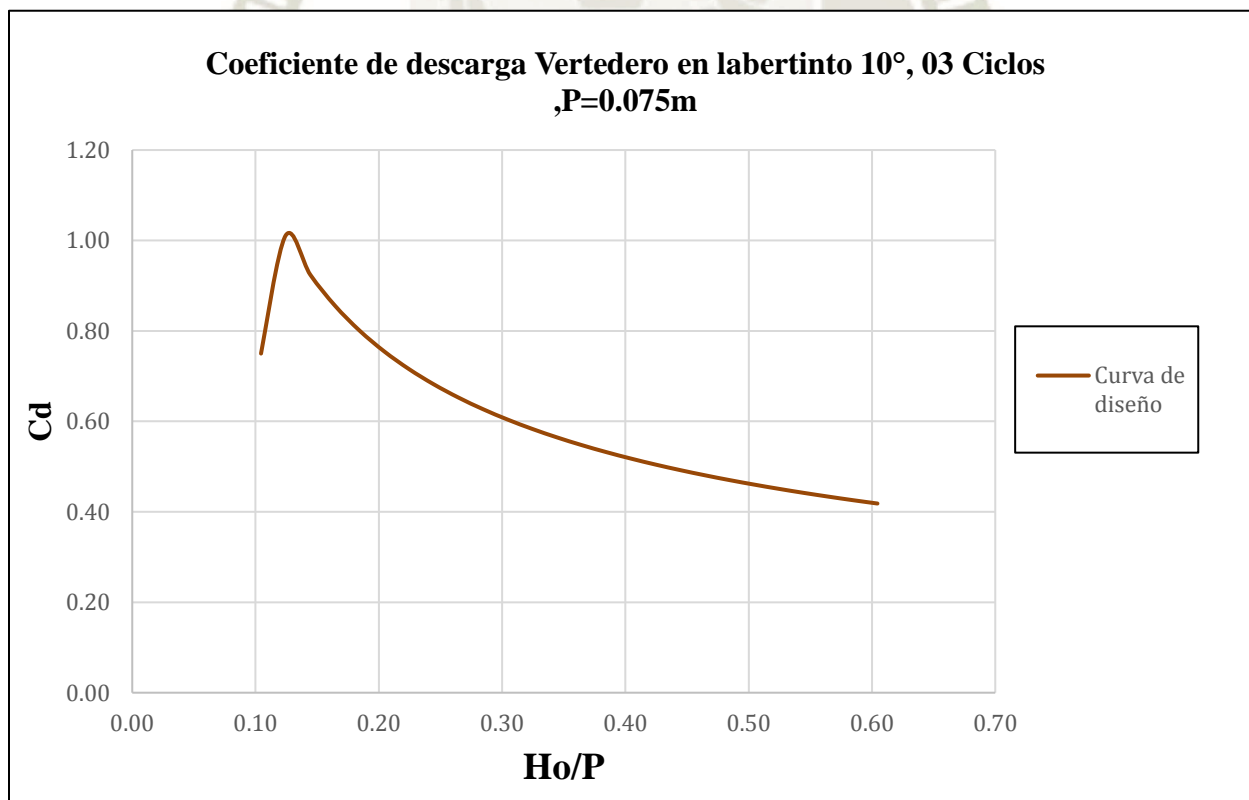


Figura 138. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 10°, 03 ciclos, P= 0.075m
Fuente: Elaboración propia

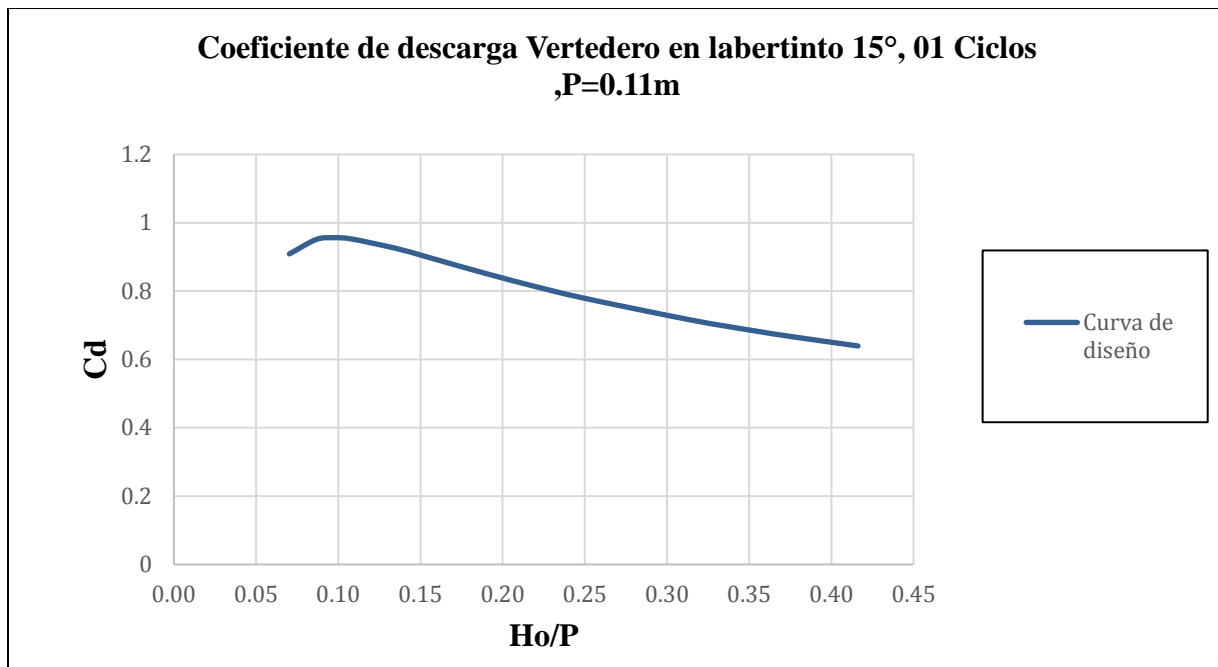


Figura 139. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 01 ciclo, P= 0.11
Fuente: Elaboración propia

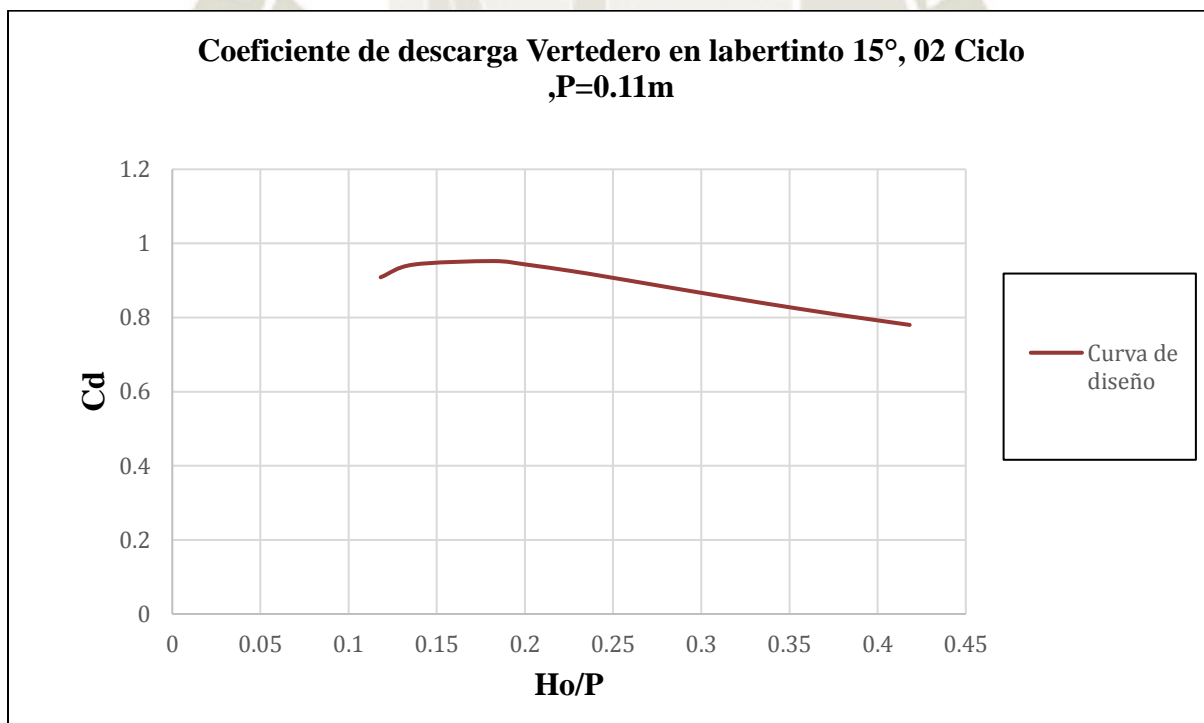


Figura 140. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 02 ciclos, P= 0.11
Fuente: Elaboración propia

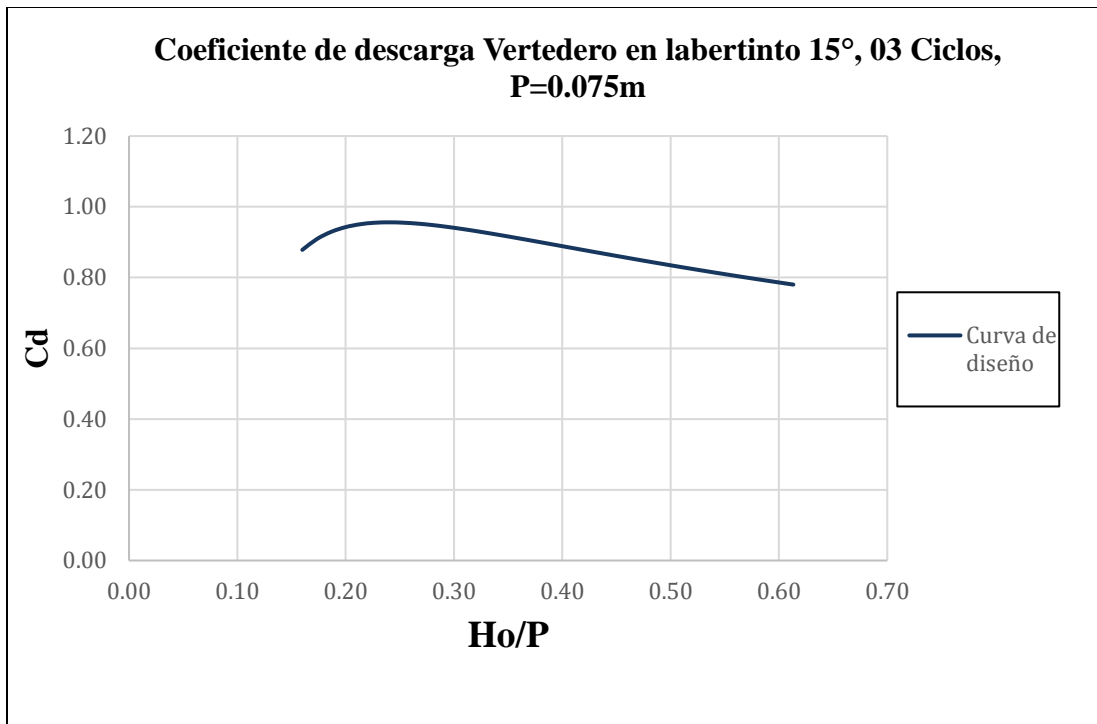


Figura 141. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 15°, 03 ciclos, P= 0.075m
Fuente: Elaboración propia

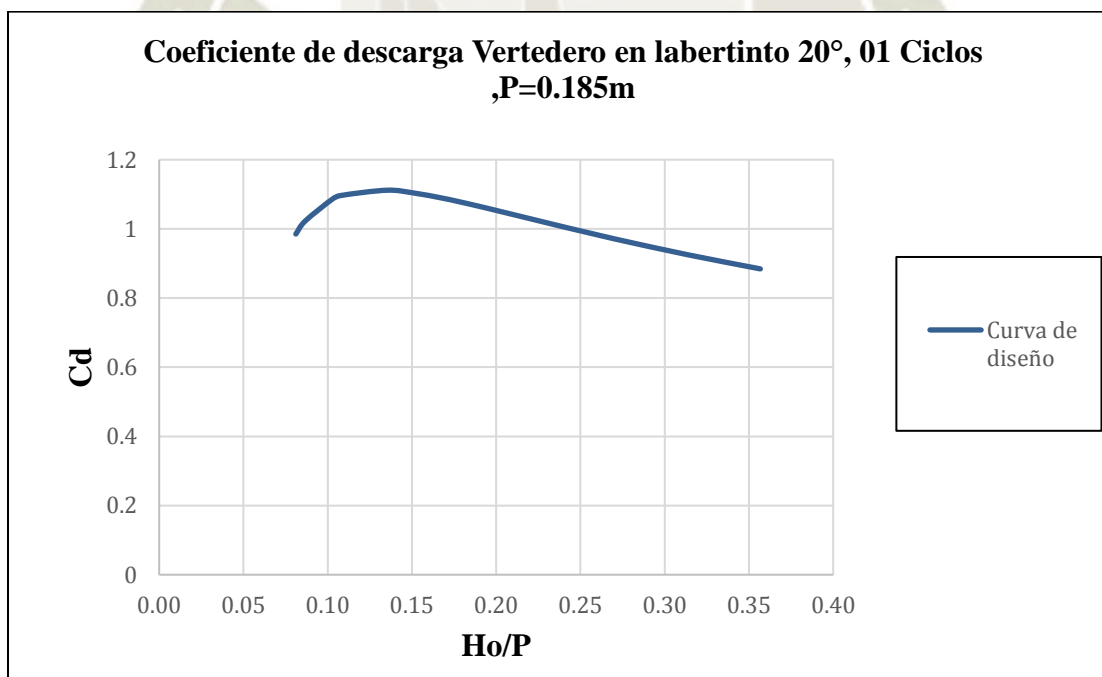


Figura 142. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20°, 01 ciclo, P= 0.185m
Fuente: Elaboración propia

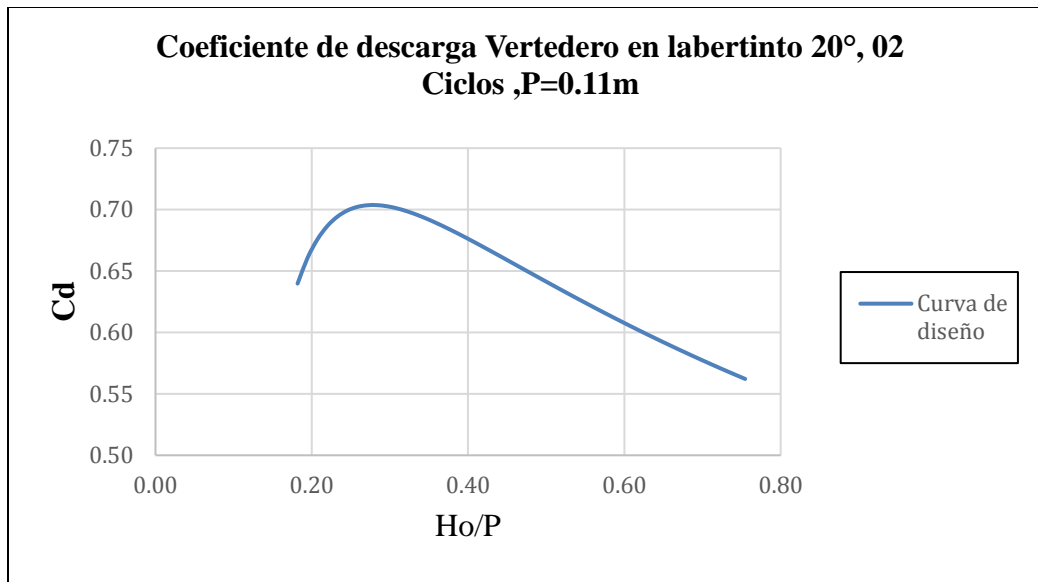


Figura 143. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20°, 02 ciclos, P= 0.11m
Fuente: Elaboración propia

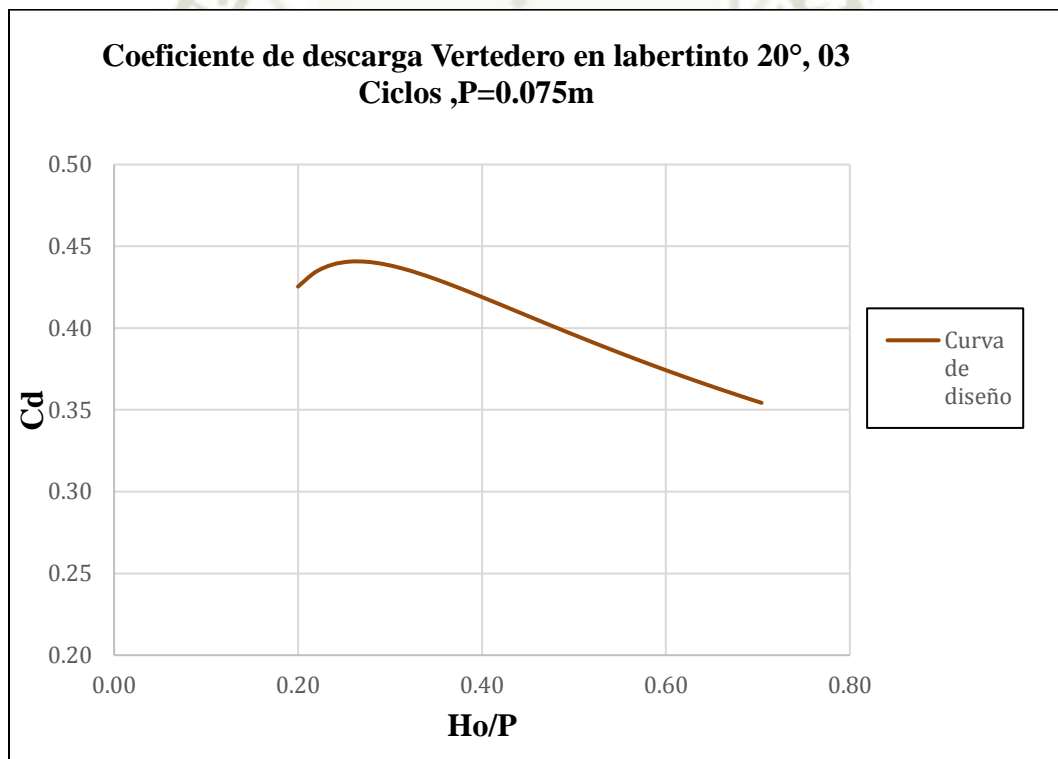


Figura 144. Curva de diseño para gasto de Vertedero en laberinto 20°, 03 ciclos, P= 0.075m
Fuente: Elaboración propia

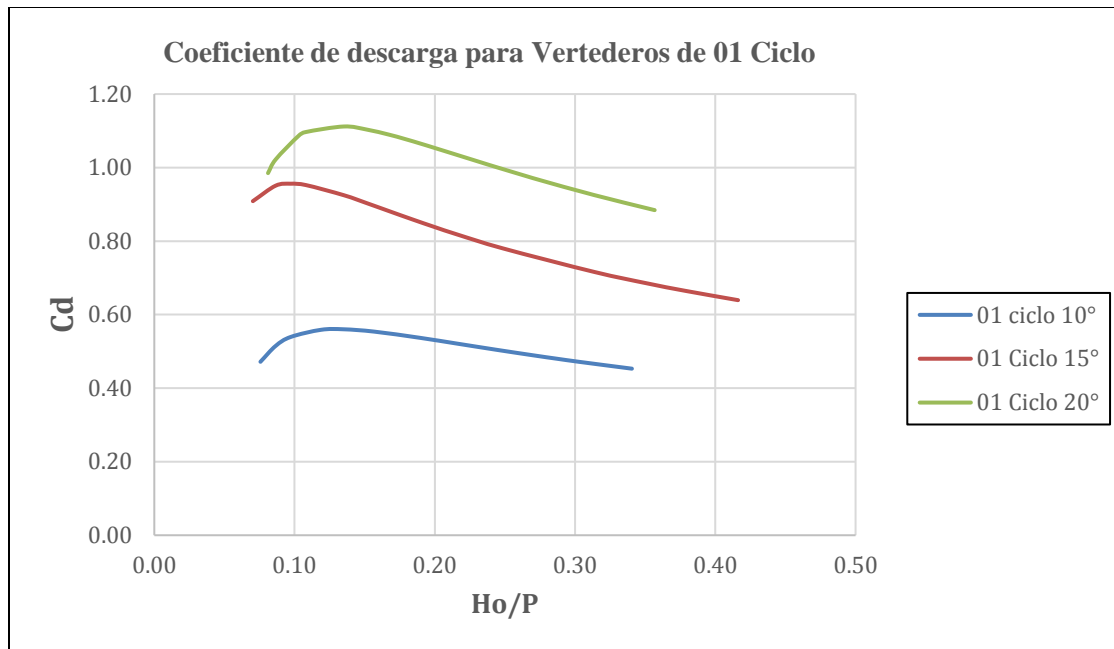


Figura 145. Rango de diseño ara vertederos de 01 Ciclo con grado grados de abertura diferente (10°,15° y20°)
Fuente: Elaboración propia

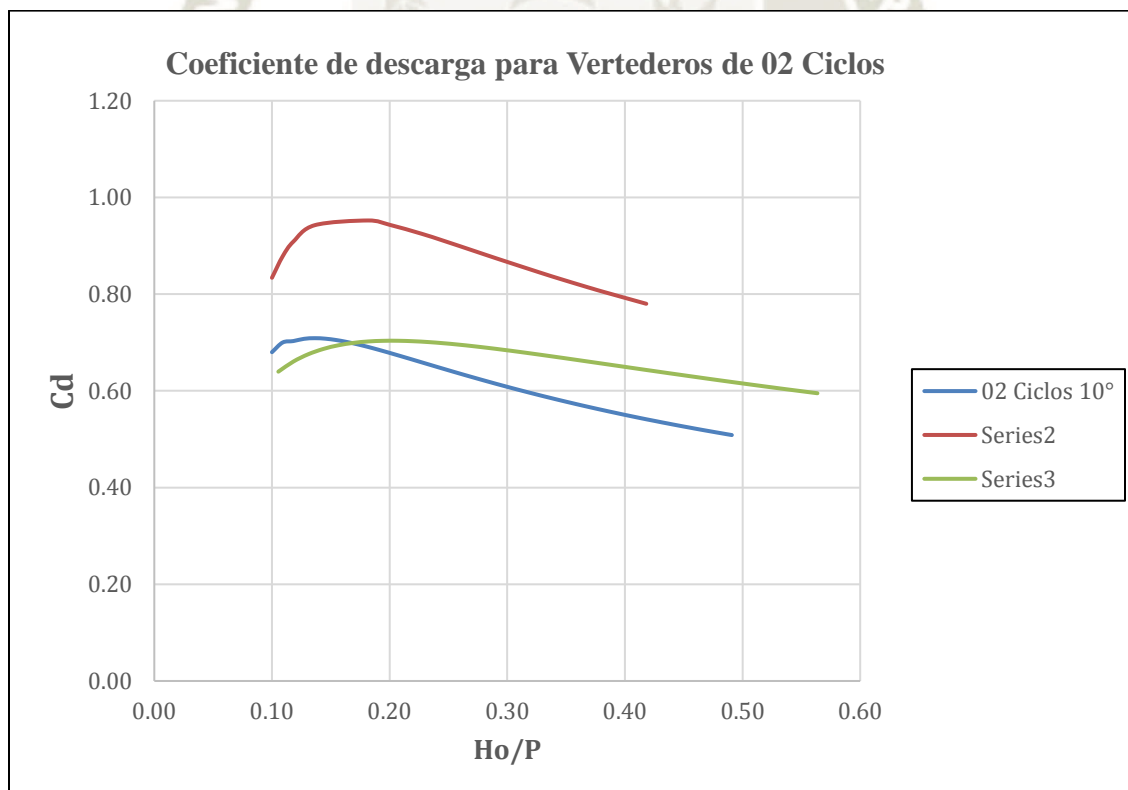


Figura 146. Rango de diseño ara vertederos de 02 Ciclos con grado grados de abertura diferente (10°,15° y20°)
Fuente: Elaboración propia

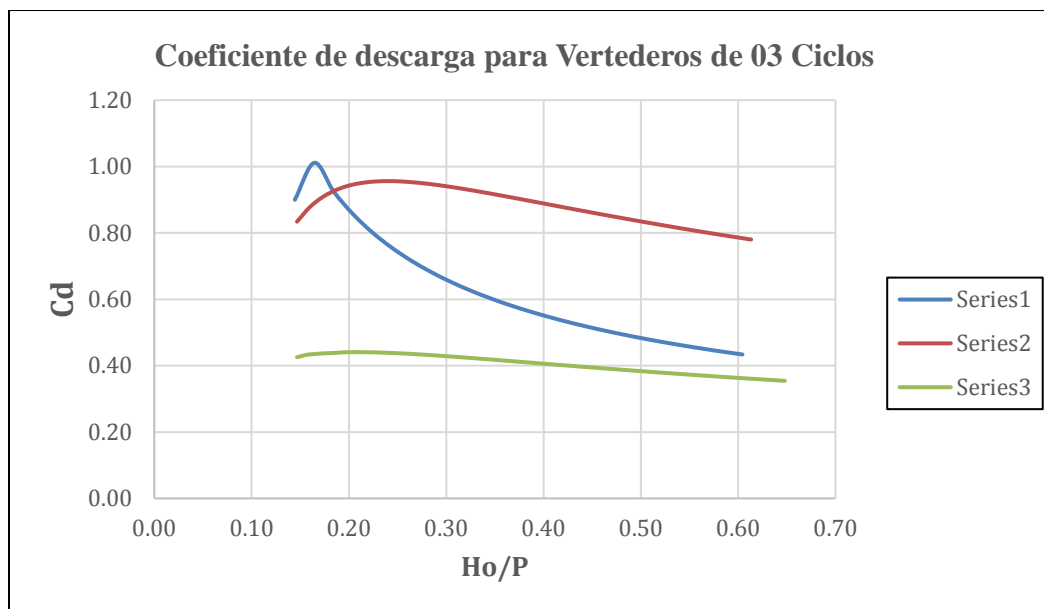


Figura 147. Rango de diseño ara vertederos de 03 Ciclos con grado grados de abertura diferente ($10^\circ, 15^\circ$ y 20°)
Fuente: Elaboración propia

2. Características Hidráulicas del vertedero en laberinto

2.1. Interferencia de láminas y sumersión local

Para mejorar las características de capacidad de descarga de los vertederos en laberinto se tiene en cuenta algunos parámetros de diseño como son: la cantidad de magnificación, la longitud efectiva y el ángulo de abertura. Como se puede apreciar en la fotografía 39, es en medio de la abertura de los ciclos del laberinto, donde se produce la interferencia de láminas vertientes, esto ocurre cuando aumentamos el caudal de prueba, siendo así que el chorro vertido por cada una de las paredes del ciclo del laberinto alcanza una distancia mayor ocupando, inclusive hasta el 50% del espacio útil de descarga, dejando al vertedero con intersección de láminas vertientes total, y por otro lado cuando el chorro vertido por las dos paredes del ciclo del vertedero alcanza a cubrir el 100% del espacio útil de descarga, podemos decir que el vertedero se encuentra en sumersión local.

De acuerdo a la experiencia en los modelos estudiados, encontramos que la distancia del chorro vertido por las paredes de cada ciclo de los vertederos aumenta al incrementar el caudal de prueba. Además, también se pudo apreciar que esta distancia varía cuando en las crestas no hay una aireación constante, creando así una variación de longitud de interferencia intermitente para caudales mayores a los 15 l/s.

El efecto producido por la interferencia de las láminas vertientes es la disminución de la descarga del vertedero.



*Fotografía 39. Longitud de interferencia (Vertedero de 02 ciclos, $Q= 15$ l/s)
Fuente: Elaboración propia.*



*Fotografía 40. Intersección de láminas vertientes (Vertedero de 02 Ciclos, $Q= 30$ L/s.)
Fuente: Elaboración propia*



*Fotografía 41 Sumersión Local (Vertedero 02 Ciclos $Q=40L/s$)
Fuente: Elaboración propia*



*Fotografía 42 Sumersión total (Vertedero 02 Ciclos $Q=48L/s$)
Fuente: Elaboración Propia*

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos generales y específicos de esta investigación, se detallan a continuación las siguientes conclusiones:

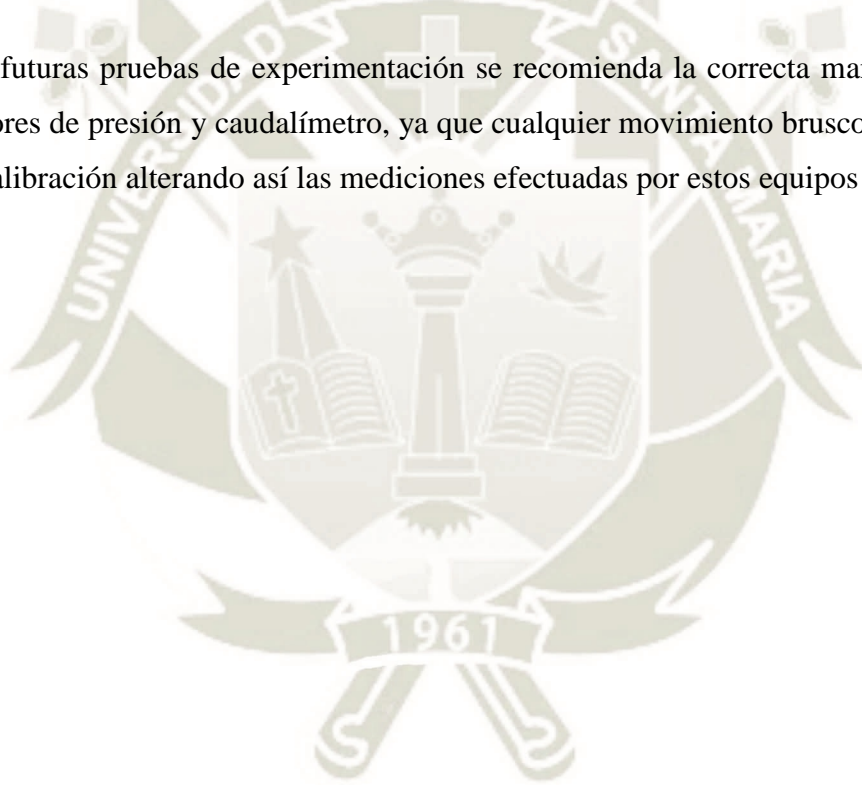
1. Se generó 09 modelos de Vertederos en Laberinto. Estos modelos se separan en 03 grupos, agrupados según el ángulo de abertura, altura de paramento y número de ciclos, es decir se realizaron 03 Vertederos de 01 ciclo, de 10°, 15° y 20° de abertura; altura de paramento (P) de 0.185m, 0.11m y 0.075m, respectivamente. Luego 03 Vertederos de 02 ciclos, de 10°, 15° y 20° de abertura; altura de paramento (P) de 0.185m, 0.11m y 0.075m, respectivamente y finalmente, 03 Vertederos de 03 ciclos, de 10°, 15° y 20° de abertura; altura de paramento (P) de 0.185m, 0.11m y 0.075m.
2. El comportamiento hidráulico de los vertederos en laberinto según lo experimentado y evaluado en el laboratorio se resume de la siguiente forma: Que la curva de gasto para todos los casos es ascendente, siendo el vertedero de 01 ciclo, 10° y P = 0.185m. el que tiene mayor capacidad de descarga, que en comparación con el vertedero de 01 ciclo, 20° y P=0.185m tiene una mayor eficiencia (31.5%) y con el vertedero de 15°, 01 ciclo y P=0.185m. la eficiencia sobrepasa aun en un (78%). Lo mismo ocurre en los demás grupos de separación, donde se ve que, para todos los casos, los vertederos de 10° son los que tienen mayor cantidad de descarga en comparación de los vertederos de 15° y 20°; esto para un valor similar de altura de carga en todos los casos.
3. Con relación a las gráficas presentadas, se puede concluir que las ecuaciones para realizar la curva de gasto hidráulico propuesta por Tullis, J.P, Nosratollah, A., y Waldron D. se ajustan a las gráficas presentadas de los vertederos de 01 ciclo; sin embargo, los valores prácticos de laboratorio, superan los propuestos por los autores para los vertederos de 02 y 03 ciclos en todos los ángulos utilizados.
4. Se demostró que el vertedero de mayor Coeficiente de descarga es el de 20° en el caso de los modelos de 01 ciclo, luego el de mayor coeficiente de descarga es el de 15° para el caso de los modelos de 02 ciclos, y finalmente es el de 10° para el caso de los modelos de 03 ciclos. Por consiguiente, la capacidad de descarga es afectada también por el número de

ciclos que presenta el vertedero y a su vez también por el ángulo de abertura con el cual es trabaja.

5. Las características geométricas influyen en la capacidad de embalse del vertedero ya que, a mayor abertura, menor es la capacidad de embalse, además el ángulo de abertura también influye en la longitud efectiva del vertedero debido al coeficiente de magnificación o relación de aumento. Finalmente, la altura de paramento también influye en la capacidad de embalse ya que a mayor altura mayor es su capacidad de descarga.
6. Las curvas de variación de pérdida de energía para todos los casos, indican que el flujo luego de la cresta del vertedero es un flujo subcrítico. Las condiciones existentes aguas abajo del vertedero son importantes ya que a partir de ellas se realizará el diseño de dicha sección.
7. Los vertederos en laberinto tienen su beneficio al aumentar la eficiencia de descarga a partir del coeficiente de magnificación, pues esta longitud efectiva de descarga aumenta para un mismo ancho de canal, sin embargo esta longitud efectiva se ve comprometida con la interferencia de láminas vertientes haciendo que decaiga la capacidad de descarga del vertedero, es por ello que para un diseño de este tipo de vertedero es de gran importancia que estos no trabajen constantemente con este tipo de interferencia y que de preferencia no trabajen en condición de sumersión local.

RECOMENDACIONES

1. Para próximos ensayos con este tipo de vertederos se recomienda ampliar el estudio cuanto a la abertura de los ángulos y el número de ciclos, ajustar los parámetros de diseño en cuanto a su relación ancho de canal con altura de paramento y tipo de acabado de crestas.
2. De ser posible hacer las mediciones de caudales y velocidades equipos de medición exacta aguas abajo del vertedero ya que con estos equipos se puede tener mejores datos para un diseño óptimo de la sección aguas abajo y poder conocer con mayor exactitud el comportamiento del flujo aguas abajo del vertedero.
3. Para futuras pruebas de experimentación se recomienda la correcta manipulación de los sensores de presión y caudalímetro, ya que cualquier movimiento brusco podría causar su descalibración alterando así las mediciones efectuadas por estos equipos electrónicos.

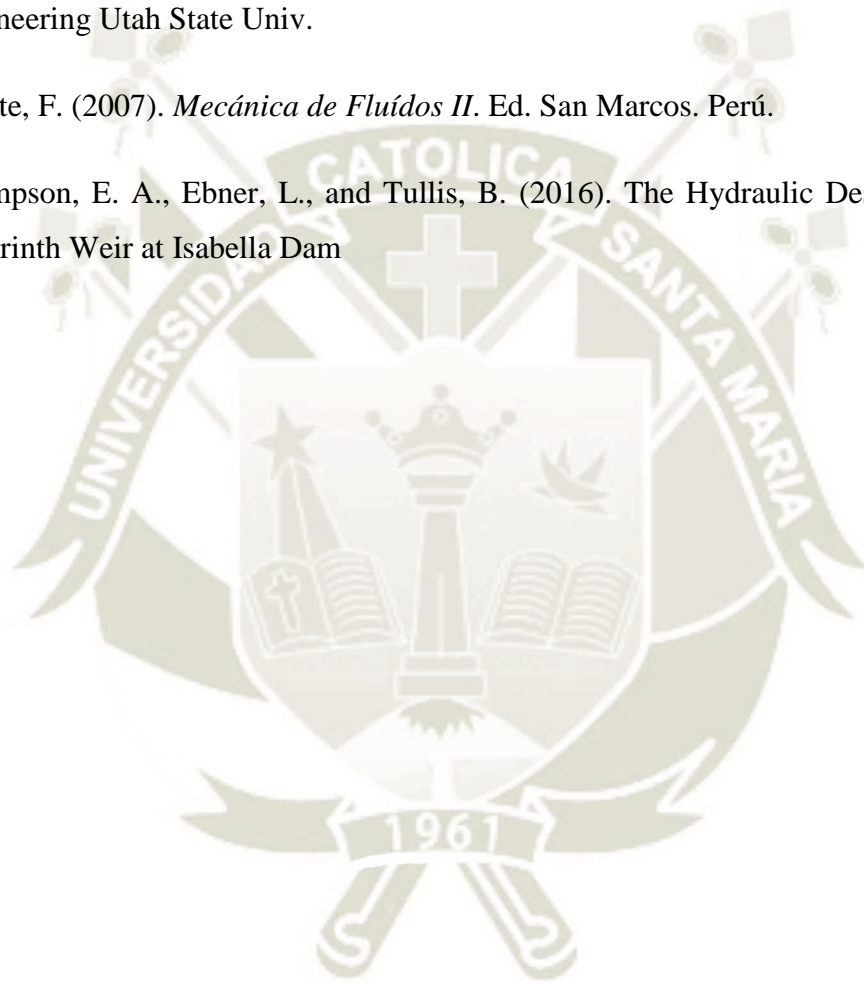


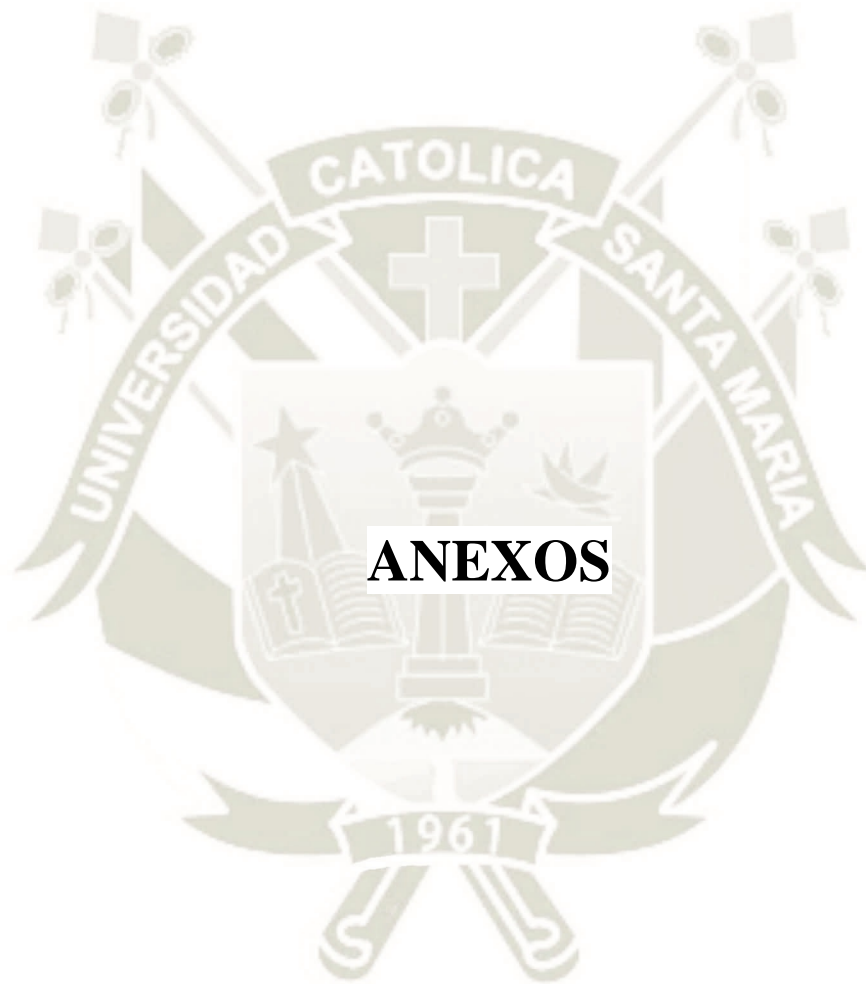
REFERENCIAS

1. B.M. Crookston, A. M. ASCE, and B. P. Tullis, M. ASCE. (2019). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships.
2. Balairón L. López D., Morán R., Ramos T., Toledo M. (2014). Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de presas.
3. Carlos Granell Ninot, Miguel Angel Toledo Municio y Andrea Marinas. (2012). Aliviaderos en laberinto y en tecla de Piano.
4. Cordero Page, Elvirio García, Victor y Granell Ninoot Carlos (2007). Aliviaderos en laberinto. Presa de María Cristina.
5. Delgado, G. 2009. Obtención de los coeficientes de descarga de aliviaderos de laberinto según especificaciones de forma. Tesis Mag. en Ingeniería. Caracas.
6. Echávez G. (1996), Introducción a modelos hidráulicos, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Erices Sepúlveda, F. E. (2013). Estudio de la influencia de aproximaciones hidrodinámicas a los ápices de aliviaderos en laberinto, en su coeficiente de descarga.
8. Falvey H. (2003), Hydraulic Design of Labyrinth Weirs (1ra. Ed.). ,Reston Virginia, American Society of Civil Engineers
9. Gómez, Rafael Pardo, Breña, Evio Alegret (2011). Diseño Hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas.
10. Harinarayan Tiwaria, Nayan Sharma. (2015). Developments to improve hydraulic competence of spillways.
11. M. Cihan Aydin, M.Emin Emiroglu (2012).Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD
12. Mamok Supraptoa (2013). Increase Spillway Capacity using Labyrinth Weir.

13. Mott, Robert L. (2006). Mecánica de Fluidos. Sexta edición.
14. P. Novak, A.I.B. Moffat y C. Nalluri, R. Narayanan (2001), Estructuras Hidráulicas. Segunda Edición.
15. San Mauro, J Salazar F., Toledo M., Caballero F., Ponce – Farfán C.y Ramos T. (2016). Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico.
16. Sotelo Avila, Guillermo (1994). Hidráulica general volumen 1- fundamentos.
17. Taylor, Geoffrey (1968) The performance of labyrinth weirs. PhD thesis, University of Nottingham
18. Tests at Boardman Labyrinth, from Babb, A.F., (1976). "Hydraulic model study of the Boardman Reservoir spillway." R.L. Albrook Hydraulic Laboratory, Washington State University, Pullman, Wash., May, permission from Albrook Hydraulic Laboratory.
19. Tullis, J. Paul, Nosratollah Amanian, David Waldron. Design of Labyrinth Spillways
20. U.S. Bureau of Reclamation (1987), Design of Small Dams, Washington, United States Department of the Interior
21. Vrengara S. (1993), Técnicas de modelación en hidráulica, Alfaomega, México DF.
22. Willi H. Hager, Michael Pfister & Blake P. Tullis. Labyrinth Weirs: Developments Until 1985
23. Granell, C., Toledo M. (2007). “Los aliviaderos tipo laberinto”. Un nuevo enfoque para su cálculo hidráulico. España.
24. A.J. Schleiss.(2011). From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland.
25. Seamons, T, (2014). "Labyrinth Weirs: A Look Into Geometric Variation and its Effect on Efficiency and Design Method Predictions. Utah State University. Logan Utah".
26. Chow, V. T. (2003). “Flujo en canales”. Mexico, editorial McGraw-Hill.

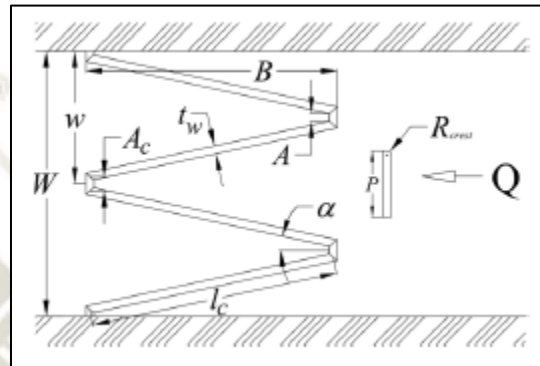
27. Barahona Ochoa E. (2020) Optimización del comportamiento de estructuras hidráulicas complejas a través de modelación física. Caso estudio: vertederos tipo laberinto y abanico-Ecuador.
28. Crookston, B., Tullis, P. (2012). “Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence” Utah Water Research Laboratory, Dept. Of Civil and Environmental Engineering Utah State Univ.
29. Ugarte, F. (2007). *Mecánica de Fluidos II*. Ed. San Marcos. Perú.
30. Thompson, E. A., Ebner, L., and Tullis, B. (2016). The Hydraulic Design of an Arced Labyrinth Weir at Isabella Dam





ANEXO N° 1

Hoja de Cálculo para el diseño de vertederos en laberinto



Diseño geométrico de vertederos en laberinto										
Proyecto	Vertedero en laberinto con 10° de abertura				Hora					
Nro de pproyecto	1				Fecha					
Datos de entrada										
PARA 01 CICLO			PARA 02 CICLOS				PARA 03 CICLOS			
Ancho del Ciclo (W)			Ancho del Ciclo (W)				Ancho del Ciclo (W)			
w	0.457		W	0.2285		W	0.1523333			
Anho del canal	Wc	0.457	Anho del canal	Wc	0.457	Anho del canal	Wc	0.457		
Nro de ciclos	n	1	Nro de ciclos	n	2	Nro de ciclos	n	3		
Longitud del vertedero L			Longitud del vertedero L				Longitud del vertedero L			
método gráfico			método gráfico				método gráfico			
Magnificación	m	5.7	Magnificación	m	5.7	Magnificación	m	5.7		
Longitud del vertedero	L	2.60	Longitud del vertedero	L	2.60	Longitud del vert	L	2.60		
Ancho del cada ciclo	W	0.457	Ancho del cada ciclo	W	0.2285	Ancho del cada c	W	0.1523333		
Long cada lado	b	1.30245	Long cada lado	b	0.651225	Long cada lado	b	0.43415		
Profundidad del Vertedero S			Profundidad del Vertedero S				Profundidad del Vertedero S			
Profundidad del Vertedero	B	1.2822495	Profundidad del Vertedero	B	0.6411247	Profundidad del Vertedero	B	0.4274165		
Altura de vertedero *supuesto segun la necesidad	P	0.185	Altura de vertedero *supuesto segun la necesidad	P	0.110	Altura de vertedero *supuesto segun la necesida	P	0.075		
relacion de aspecto	w/P		relacion de aspecto	w/P		relacion de aspect	w/P			
2 ≤ W/P ≤ 2.5	2.4702703	correcto	2 ≤ W/P ≤ 2.5	2.0772727	correcto	2 ≤ W/P ≤ 2.5	2.0311111	correcto		
valores poropuestos por Lux 1989			valores poropuestos por Lux 1989				valores poropuestos por Lux 1989			
vertedero eficientemente hidráulico			vertedero eficientemente hidráulico				vertedero eficientemente hidráulico			

ANEXO N° 2

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 01 ciclo, 10°, P = 0.185m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.43936	0.0703	0.51773	0.2216
0.47177	0.0757	0.51449	0.2270
0.49628	0.0811	0.51125	0.2324
0.51485	0.0865	0.50803	0.2378
0.52886	0.0919	0.50484	0.2432
0.53934	0.0973	0.50167	0.2486
0.54705	0.1027	0.49852	0.2541
0.55259	0.1081	0.49541	0.2595
0.55639	0.1135	0.49233	0.2649
0.55881	0.1189	0.48929	0.2703
0.56010	0.1243	0.48627	0.2757
0.56049	0.1297	0.48330	0.2811
0.56015	0.1351	0.48036	0.2865
0.55922	0.1405	0.47746	0.2919
0.55780	0.1459	0.47459	0.2973
0.55598	0.1514	0.47177	0.3027
0.55385	0.1568	0.46898	0.3081
0.55145	0.1622	0.46623	0.3135
0.54885	0.1676	0.46351	0.3189
0.54608	0.1730	0.46083	0.3243
0.54317	0.1784	0.45819	0.3297
0.54016	0.1838	0.45559	0.3351
0.53707	0.1892	0.45302	0.3405
0.53392	0.1946	0.45049	0.3459
0.53072	0.2000	0.44800	0.3514
0.52749	0.2054		
0.52424	0.2108		
0.52099	0.2162		

ANEXO N° 3

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 02 ciclos, 10°, P = 0.11m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.68000	0.1000	0.57498	0.3545
0.70000	0.1091	0.56983	0.3636
0.70298	0.1182	0.56480	0.3727
0.70765	0.1273	0.55988	0.3818
0.70898	0.1364	0.55507	0.3909
0.70792	0.1455	0.55037	0.4000
0.70514	0.1545	0.54577	0.4091
0.70114	0.1636	0.54127	0.4182
0.69625	0.1727	0.53687	0.4273
0.69074	0.1818	0.53257	0.4364
0.68479	0.1909	0.52836	0.4455
0.67855	0.2000	0.52423	0.4545
0.67212	0.2091	0.52020	0.4636
0.66559	0.2182	0.51625	0.4727
0.65900	0.2273	0.51238	0.4818
0.65242	0.2364	0.50860	0.4909
0.64587	0.2455		
0.63938	0.2545		
0.63297	0.2636		
0.62665	0.2727		
0.62044	0.2818		
0.61434	0.2909		
0.60835	0.3000		
0.60249	0.3091		
0.59674	0.3182		
0.59112	0.3273		
0.58562	0.3364		
0.58024	0.3455		

ANEXO N° 4

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 03 ciclos, 10°, P = 0.075m

Coeficiente de descarga	Ho/P
0.90102	0.1044
0.10201	0.1244
0.92409	0.1444
0.85584	0.1644
0.80053	0.1844
0.75458	0.2044
0.71564	0.2244
0.68210	0.2444
0.65283	0.2644
0.62701	0.2844
0.60400	0.3044
0.58333	0.3244
0.56464	0.3444
0.54762	0.3644
0.53205	0.3844
0.51773	0.4044
0.50451	0.4244
0.49224	0.4444
0.48083	0.4644
0.47017	0.4844
0.46018	0.5044
0.45081	0.5244
0.44198	0.5444
0.43365	0.5644
0.42578	0.5844
0.41832	0.6044

ANEXO N° 5

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 01 ciclo, 15°, P = 0.185m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.90868	0.0703	0.81118769	0.2216216	0.6687996	0.372973
0.92924	0.0757	0.80474383	0.227027	0.6649087	0.3783784
0.94262	0.0811	0.79841398	0.2324324	0.6610814	0.3837838
0.95071	0.0865	0.79219787	0.2378378	0.6573161	0.3891892
0.95488	0.0919	0.7860948	0.2432432	0.6536114	0.3945946
0.95610	0.0973	0.78010369	0.2486486	0.6499657	0.4000000
0.95509	0.1027	0.77422316	0.2540541	0.6463776	0.4054054
0.95238	0.1081	0.76845161	0.2594595	0.6428457	0.4108108
0.94840	0.1135	0.76278725	0.2648649	0.6393687	0.4162162
0.94344	0.1189	0.75722817	0.2702703		
0.93775	0.1243	0.75177233	0.2756757		
0.93150	0.1297	0.74641766	0.2810811		
0.92485	0.1351	0.741162	0.2864865		
0.91791	0.1405	0.73600317	0.2918919		
0.91076	0.1459	0.730939	0.2972973		
0.90347	0.1514	0.72596729	0.3027027		
0.89611	0.1568	0.72108586	0.3081081		
0.88871	0.1622	0.71629256	0.3135135		
0.88131	0.1676	0.71158526	0.3189189		
0.87393	0.1730	0.70696184	0.3243243		
0.86661	0.1784	0.70242026	0.3297297		
0.85935	0.1838	0.69795847	0.3351351		
0.85217	0.1892	0.69357451	0.3405405		
0.84508	0.1946	0.68926642	0.3459459		
0.83809	0.2000	0.68503233	0.3513514		
0.83120	0.2054	0.68087037	0.3567568		
0.82442	0.2108	0.67677876	0.3621622		
0.81775	0.2162	0.67275574	0.3675676		

ANEXO N° 6

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 2 ciclos, 15°, P = 0.11m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.83389	0.1000	0.82441544	0.3545455
0.87823	0.1091	0.81774523	0.3636364
0.90868	0.1182	0.81118769	0.3727273
0.92924	0.1273	0.80474383	0.3818182
0.94262	0.1364	0.79841398	0.3909091
0.95071	0.1455	0.79219787	0.4000000
0.95488	0.1545	0.7860948	0.4090909
0.95610	0.1636	0.78010369	0.4181818
0.95509	0.1727		
0.95238	0.1818		
0.94840	0.1909		
0.94344	0.2000		
0.93775	0.2091		
0.93150	0.2182		
0.92485	0.2273		
0.91791	0.2364		
0.91076	0.2455		
0.90347	0.2545		
0.89611	0.2636		
0.88871	0.2727		
0.88131	0.2818		
0.87393	0.2909		
0.86661	0.3000		
0.85935	0.3091		
0.85217	0.3182		
0.84508	0.3273		
0.83809	0.3364		
0.83120	0.3455		

ANEXO N° 7

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 3 ciclos, 15°, P = 0.075m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.73186	0.1600	0.79369390	0.5333333
0.77887	0.1733	0.78801089	0.5466667
0.81308	0.1867	0.78238983	0.5600000
0.83788	0.2000	0.77683522	0.5733333
0.85564	0.2133	0.77135056	0.5866667
0.86807	0.2267	0.76593853	0.6000000
0.87642	0.2400	0.76060110	0.6133333
0.88162	0.2533	0.75533967	0.6266667
0.88436	0.2667		
0.88517	0.2800		
0.88448	0.2933		
0.88259	0.3067		
0.87975	0.3200		
0.87618	0.3333		
0.87201	0.3467		
0.86739	0.3600		
0.86241	0.3733		
0.85715	0.3867		
0.85168	0.4000		
0.84605	0.4133		
0.84032	0.4267		
0.83451	0.4400		
0.82866	0.4533		
0.82278	0.4667		
0.81691	0.4800		
0.81105	0.4933		
0.80522	0.5067		
0.79943	0.5200		

ANEXO N° 8

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 1 ciclos, 20°, P = 0.185m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.98499	0.0811	1.01469571	0.2324324
1.02183	0.0865	1.00830971	0.2378378
1.04964	0.0919	1.00196699	0.2432432
1.07044	0.0973	0.99567433	0.2486486
1.08576	0.1027	0.98943731	0.2540541
1.09675	0.1081	0.98326051	0.2594595
1.10429	0.1135	0.97714766	0.2648649
1.10908	0.1189	0.97110177	0.2702703
1.11165	0.1243	0.96512520	0.2756757
1.11243	0.1297	0.95921977	0.2810811
1.11176	0.1351	0.95338688	0.2864865
1.10990	0.1405	0.94762750	0.2918919
1.10708	0.1459	0.94194227	0.2972973
1.10348	0.1514	0.93633155	0.3027027
1.09924	0.1568	0.93079546	0.3081081
1.09449	0.1622	0.92533391	0.3135135
1.08932	0.1676	0.91994660	0.3189189
1.08382	0.1730	0.91463313	0.3243243
1.07805	0.1784	0.90939294	0.3297297
1.07208	0.1838	0.90422537	0.3351351
1.06594	0.1892	0.89912967	0.3405405
1.05968	0.1946	0.89410501	0.3459459
1.05333	0.2000	0.88915051	0.3513514
1.04693	0.2054	0.88426524	0.3567568
1.04048	0.2108		
1.03402	0.2162		
1.02756	0.2216		
1.02112	0.2270		

ANEXO N° 9

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 2 ciclos, 20°, P = 0.11m

Coeficiente de descarga	Ho/P	Coeficiente de descarga	Ho/P
0.52065	0.1436	0.65474606	0.4618182
0.57299	0.1564	0.65025839	0.4745455
0.61144	0.1691	0.64578057	0.4872727
0.63977	0.1818	0.64132240	0.5000000
0.66060	0.1945	0.63689193	0.5127273
0.67579	0.2073	0.63249576	0.5254545
0.68667	0.2200	0.62813927	0.5381818
0.69423	0.2327	0.6238268	0.5509091
0.69921	0.2455	0.61956183	0.5636364
0.70216	0.2582	0.61534712	0.5763636
0.70352	0.2709	0.61118482	0.5890909
0.70361	0.2836	0.60707657	0.6018182
0.70269	0.2964	0.60302355	0.6145455
0.70097	0.3091	0.59902661	0.6272727
0.69862	0.3218	0.59508627	0.6400000
0.69575	0.3345	0.59120279	0.6527273
0.69248	0.3473	0.58737621	0.6654545
0.68889	0.3600	0.58360641	0.6781818
0.68504	0.3727	0.57989309	0.6909091
0.68100	0.3855	0.57623583	0.7036364
0.67682	0.3982	0.57263411	0.7163636
0.67252	0.4109	0.56908733	0.7290909
0.66814	0.4236	0.56559479	0.7418182
0.66370	0.4364	0.56215576	0.7545455
0.65923	0.4491		

ANEXO N° 10

Tabla de diseño para coeficientes de descarga vertedero en laberinto 3 ciclos, 20°, P =
0.075m

Coeficiente de descarga	Ho/P
0.4253856	0.2000
0.4341109	0.2187
0.4387614	0.2373
0.4406148	0.2560
0.4405220	0.2747
0.4390632	0.2933
0.4366424	0.3120
0.4335451	0.3307
0.4299763	0.3493
0.4260848	0.3680
0.4219795	0.3867
0.4177409	0.4053
0.4134283	0.4240
0.4090863	0.4427
0.4047476	0.4613
0.4004368	0.4800
0.3961719	0.4987
0.3919662	0.5173
0.3878293	0.5360
0.3837677	0.5547
0.3797861	0.5733
0.3758874	0.5920
0.3720731	0.6107
0.3683438	0.6293
0.3646996	0.6480
0.3611396	0.6667
0.3576627	0.6853
0.3542676	0.7040