



Título del Trabajo Fin de Máster:

***CARACTERIZACIÓN DE
VERTEDEROS HIDRÁULICOS
MEDIANTE TÉCNICAS CFD***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

NGAMALIEU NENGOUE, ULRICH AURÈLE

Director/es:

DR. IGLESIAS REY, PEDRO L.

DR. MARTINEZ SOLANO, F. JAVIER

Fecha: **JULIO, 2015**

Título del Trabajo Fin de Máster:
***CARACTERIZACIÓN DE VERTEDEROS HIDRÁULICOS MEDIANTE
TÉCNICAS CFD***

Autor: ***NGAMALIEU NENGOUE, ULRICH AURÈLE***

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	<i>PEDRO L. IGLESIAS REY</i>	Fecha de Lectura	<i>JULIO, 2015</i>
Codirector1	<i>F. JAVIER MARTINEZ SOLANO</i>		
Codirector2			
Tutor	<i>PEDRO L. IGLESIAS REY</i>		

RESUMEN:

Los vertederos son elementos complejos y importantes que se utilizan en sistemas de distribución de agua, en saneamientos, en sistemas de evacuación de aguas residuales y en sistemas de control de aguas pluviales y permiten controlar el nivel en embalses, canales y depósitos, también permiten derivar caudales y elevar el nivel de agua.

El problema que surge cuanto al uso de estas geometrías complejas es la dificultad de determinar a priori la capacidad en función del caudal de agua en las mismas. Numerosos estudios más o menos experimentales que pretenden evaluar la capacidad hidráulica de este tipo de dispositivos existen.

En este trabajo, haremos un estudio teórico del comportamiento de diferentes vertederos hidráulicos a fin de conocer su caracterización matemática. Luego un modelo de geometría computacional está creado para estudiar las características de 3 tipos de vertederos en pared delgada de forma: triangular, rectangular y trapezoidal en la versión educacional del modelo ANSYS Fluent: ANSYS R15.0 Academic.

Las ecuaciones Promediadas de Reynolds Navier-Stokes (RANS) están aplicadas para describir el flujo de agua en un canal rectangular abierto que tiene un vertedero aguas abajo. El modelo de turbulencia de las dos ecuaciones $k - \epsilon$ en tres dimensiones está adoptado para la simulación numérica. El método fraccionado de Volumen de Fluido (VOF) está utilizado también. Este método es eficiente para tratar problemas complicados de superficie libre. Los resultados de la simulación están validados usando datos experimentales de altura de agua.

Los perfiles de superficies libres de los flujos del agua del canal y entre los vertederos de pared delgada de forma triangular, rectangular y trapezoidal han sido dibujados para poder visualizar la elevación del agua dentro del canal provocada por la presencia de los vertederos. Las medidas realizadas han sido hechas para varios caudales en fin de poder presentar la curva de evolución de la altura de agua en función del caudal.

RESUM:

Els abocadors són elements complexos i importants que s'utilitzen en sistemes de distribució d'aigua, en sanejaments, en sistemes d'evacuació d'aigües residuals i en sistemes de control d'aigües pluvials i permeten de controlar el nivell en embassaments, canals i dipòsits, també

permeten derivar cabals i elevar el nivell d'aigua.

El problema que sorgeix quant a l'ús d'aquestes geometries complexes és la dificultat de determinar a priori la capacitat en funció del nivell d'aigua a les mateixes. Nombrosos estudis més o menys experimentals que pretenen avaluar la capacitat hidràulica d'aquest tipus de dispositius existeixen.

En aquest treball, farem un estudi teòric del comportament de diferents abocadors hidràulics a fi de conèixer la seva caracterització matemàtica. Després un model de geometria computacional aquesta creat per estudiar les característiques de 3 tipus d'abocadors en paret prima de forma: triangular, rectangular i trapezoïdal en la versió educacional del model ANSYS Fluent: ANSYS R15.0 Academic.

Les equacions mitjanades Reynolds Navier-Stokes (RANS) estan aplicades per descriure el flux d'aigua en un canal rectangular obert que té un abocador aigües abajos. El model de turbulència de les dues equacions $k - \varepsilon$ en tres dimensions aquesta adoptat per a la simulació numèrica. El mètode fraccionat de Volum de Fluid (VOF) aquesta utilitzat també. Aquest mètode és eficient per tractar problemes complicat de superfície lliure. Els resultats de la simulació estan validat usant dades experimentals d'altura d'aigua.

Els perfils de superfícies lliures dels fluxos de l'aigua del canal i entre els abocadors de paret prima de forma triangular, rectangular i trapezoïdal han estat dibuixats per poder visualitzar l'elevació de l'aigua dins del canal provocada per la presència dels abocadors. Les mesures realitzada han estat fetes per diversos cabals en tal de poder presentar la corba d'evolució de l'altura d'aigua en funció del cabal.

ABSTRACT:

Weirs are complex and important elements used in water distribution systems, in sanitation, drainage systems and wastewater control systems rainwater and allow to control the level in canals and reservoirs, also allow to derive flow and raise the water level.

The problem that arises for the use of these complex geometries is the difficult to determine a priori the capacity depending on the water level therein. Numerous experimental studies about seeking to assess the hydraulic capacity of such devices exist.

In this paper, we will make a theoretical study of the behavior of different hydraulic weirs in order to meet its mathematical characterization. Then computational geometry model is created to study the characteristics of 3 types of shape crested : triangular, rectangular and trapezoidal in educational version of the model ANSYS Fluent: ANSYS R15.0 Academic.

The Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations are applied to describe the flow of water in a rectangular open channel having a sharp crested weir. The turbulence model of the two equations $k - \varepsilon$ in three dimensions is adopted for numerical simulation. The fractional volume of fluid method (VOF) is also used. This method is efficient to treat complicated free surface problems. The simulation results are validated using experimental data.

Free surface profiles of water flows from the channel and through the sharp crested weirs from the following geometries: triangular, rectangular and trapezoidal are drawn to display the

elevation of water in the channel due to the presence of sharp crested weir. The measures undertaken have been made for various flow rates in order to present the evolution curve of the water height depending on the flow.

Palabras clave:

***Vertedero/mecánica de fluidos computacional (CFD)/ecuaciones RANS/
medición a lámina libre / Fracción de volumen***

DEDICATORIA

Esta Memoria está dedicada a la memoria amable de mi difunto Padre

También está dedicada a mi maravillosa Madre

A mi preciosa y tierna Novia

Y a nuestra adorable Niña

AGRADECIMIENTOS

Antes de todo quiero decir gracias a Dios quien me bendiga y me dio la fortaleza necesaria para llevar a cabo este Trabajo de fin de Master.

Quiero también decir gracias a mi madre, mis hermanos y hermanas por sus asistencias y consejos.

Un agradecimiento especial a mi novia y nuestra niña cuyas voces y sonrisas nunca han parado de darme la fuerza necesaria para salir adelante pese a las dificultades.

Gracias a los coordinadores de la beca Erasmus Mundus que me han permitido realizar este Master.

Gracias a mis amigos también becarios de Erasmus Mundus que han sido todo el rato mi segunda familia aquí en Valencia.

Gracias a mi amigo Amilkar Ernesto Ilaya Ayza por su ayuda, su asistencia y sus consejos durante todo el tiempo de este Master.

Gracias a todos los profesores del Master de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en particular a mis tutores Pedro L. Iglesias y F. Javier Solano por sus enseñamientos, consejos, ayudas y orientaciones que me han permitido tener nuevos conocimientos y llevar a cabo este Trabajo de fin de Master.

Gracias a todos mis compañeros del Master

Para acabar gracias a todos mis amigos y amigas y a todas las personas que han creído en mí.

ÍNDICE

RESUMEN	i
RESUM.....	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPITULO I: GENERALIDADES SOBRE LOS CANALES Y CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS	3
I.1 – Generalidades sobre los Canales.....	3
I.1.1 - Definición	3
I.1.2 - Tipos de canales	3
I.1.3 – Características geométrico-hidráulicas de los canales y de una sección transversal de un canal	3
I.1.3.1 – Tramo de canal prismático	3
I.1.3.2 – Características geométricas de los canales y de una sección transversal de un canal	4
I.1.3.3 – Parámetros hidráulicos de los canales y de una sección transversal de un canal	5
I.1.3.3 – Formas de los canales y velocidad media	6
I.1.3.4 – Rugosidad de un Canal	7
I.1.4 – Tipos de régimen en flujos en lámina libre	11
I.1.4.1 – Variabilidad temporal.....	11
I.1.4.2 – Variabilidad espacial.....	12
I.1.4.3 – Influencia de la viscosidad.....	13
I.1.4.4 – Influencia de la gravedad	13
I.2 – Caracterización de los Vertederos.....	15
I.2.1 – Definición.....	15
I.2.2 – Función de los vertederos	16
I.2.3 – Partes de un vertedero.....	16
I.2.4 – Clasificación de los vertederos	17
I.2.5 – Estado del arte sobre la caracterización de vertederos.....	17
I.2.4 – Formulas teóricas de descarga de los vertederos	18

I.2.4.1 – Vertederos rectangulares.....	18
I.2.4.2 – Vertederos triangulares.....	25
I.2.4.3 – Vertederos trapezoidales: Vertedero tipo Cipolletti.....	27
I.2.4.4 – Vertedero de pared gruesa (o de cresta ancha).....	30
I.2.4.5 – Vertedero Laterales: Aliviaderos.....	32
CAPITULO II: METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ANÁLISIS DE VERTEDEROS MEDIANTE TÉCNICAS	
CFD	35
II.1 – Metodología de Trabajo	35
II.1.1 – Análisis mediante técnicas CFD del comportamiento de los vertederos.....	35
II.1.2 – Validación experimental del comportamiento de los vertederos.	35
II.1.2.1 – Descripción del Dispositivo experimental	35
II.1.2.2 – Características de los 3 vertederos: Triangular, rectangular y trapezoidal.....	36
II.1.2.3 – Metodología experimental.....	37
II.1.2.4 – Visualización de la lámina de Agua	37
II.1.3 – Comparación de los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura.....	38
II.1.4 – Aplicación de los resultados al modelo SWMM 5.....	39
II.2 – Análisis de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD.....	42
II.2.1 – Definición la Geometría.....	43
II.2.2 – Generación de la Malla.....	44
II.2.3 – Definición de las Condiciones limites	47
II.2.4 – Modelo computacional: Calibración del solver de cálculo y resolución del problema	48
II.2.5 – Post Tratamiento: Procesamiento de datos numéricos.....	57
CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS	
HIDRÁULICOS MEDIANTE TÉCNICAS CFD	59
III.1 – Presentación y análisis de los resultados del estudio	59
III.1.1 – Presentación y análisis de los resultados de las técnicas CFD	59
III.1.2 – Presentación de los resultados experimentales.....	65
III.1.2 – Comparación de los resultados obtenidos con la literatura	67
III.2 – Aplicación del comportamiento en SWMM 5	69
CONCLUSIÓN GENERAL.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	75

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los vertederos hidráulicos son elementos complejos y importantes que se utilizan en sistemas de distribución de agua, en redes de saneamientos, en sistemas de evacuación de aguas residuales y en sistemas de control de aguas pluviales y permiten controlar el nivel en embalses, canales y depósitos, también permiten derivar caudales y elevar el nivel de agua.

Los vertederos hidráulicos son de formas y de tamaños diversos. Existen vertederos de pared delgada y de pared gruesa, vertederos laterales, vertederos circulares, parabólicos, triangulares, rectangulares y trapezoidales.

Cada día es más frecuente la instalación de estos elementos complejos en los sistemas nombrados arribas. El problema que surge en cuanto al uso de estas geometrías complejas es la dificultad de determinar a priori la capacidad en función del caudal de agua en las mismas y además tenemos que incluir su representación en los modelos de análisis de redes de saneamientos y de drenaje, dónde se nos impone la necesidad de caracterizar los vertederos.

Numerosos estudios experimentales que pretenden evaluar la capacidad hidráulica de este tipo de dispositivos existen pero, muchos modelos prácticos de canales en lámina libre que antes se investigaron de forma clásica por experiencias hidráulica hoy en día están resueltos usando los modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD).

El objetivo de este trabajo se centra en la validación de las tecnologías basadas en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como alternativa para caracterizar adecuadamente los vertederos hidráulicos.

CFD son técnicas de diseño y de análisis de alta precisión basados en programas que funcionan en ordenadores. Los primeros códigos de CFD fueron desarrollados por la industria Aeroespacial en los años 1961. Desde entonces, el uso del CFD se ha extendido a todos los sectores donde la dinámica de fluidos tiene un papel importante.

Sin duda, este tipo de técnicas son una alternativa a la utilización de dispositivos o modelos experimentales en laboratorios de Hidráulica. Estos laboratorios son normalmente enormes y tiene grandes costes tanto de construcción como de consumo de agua y de energía. Por eso se plantea la utilización de modelos basados en técnicas CFD como alternativa de futuro a este tipo de ensayos experimentales.

De forma específica el trabajo planteado persigue los siguientes objetivos:

- Estudio teórico del comportamiento de diferentes vertederos hidráulicos a fin de conocer su caracterización matemática. Definición de los parámetros críticos en su definición.

- Planteamiento del análisis mediante técnicas CFD del problema de un vertedero hidráulico.
- Estudio del tamaño de malla necesario para el análisis.
- Determinación de los parámetros de modelización del comportamiento de un vertedero mediante técnicas CFD.
- Análisis mediante técnicas CFD del comportamiento de 3 vertederos de geometría conocidas: triangular, rectangular y trapezoidal.
- Validación experimental de comportamiento de los vertederos estudiados en laboratorio.
- Análisis de las diferencias de modelización realizada mediante técnicas CFD y de las obtenidas experimentalmente.
- Análisis y discusión del modelo de comportamiento de vertederos implementados en el modelo SWMM 5.
- Elaboración de una metodología para la caracterización de vertederos de cualquier geometría mediante técnicas CFD.

Para cumplir los objetivos de nuestro trabajo, la experimentación se realizó en el laboratorio de Mecánica de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), el desarrollo numérico y computacional se realizaron en SWMM 5 y en la versión educacional del Modelo ANSYS Fluent.

Esta memoria está compuesta de varias partes:

- Una introducción general dónde se plantea lo problemática y los objetivos que queremos alcanzar al final del trabajo.
- Un primer capítulo que presenta las generalidades sobre los canales y las características de los vertederos. Se intenta definir los parámetros críticos y estudiar el comportamiento de los vertederos hidráulicos a fin de conocer su caracterización matemática.
- Un segundo capítulo donde presentamos la metodología empleada para llevar a cabo este trabajo. También se presenta el modelo experimental así como la metodología de experimentación de laboratorio y las características de los elementos del modelo. El modelo SWMM 5 está calibrado y para terminar la metodología de análisis de los vertederos mediante técnicas CFD ha sido presentada y los elementos de resolución del problema detallados
- Un tercer capítulo donde presentamos y analizamos los resultados obtenidos de la caracterización de cada tipo de vertedero. Se han hecho Comparaciones con resultados de la literatura también se realiza una validación del comportamiento de los vertederos en SWMM 5.
- La memoria finaliza con más conclusiones generales y desarrollos futuros.

CAPITULO I: GENERALIDADES SOBRE LOS CANALES Y CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS

Introducción

La hidráulica está compuesta de 2 partes principales que son: La hidráulica del flujo a presión y la hidráulica en lámina libre.

En la parte del flujo a presión se trabaja principalmente con tuberías circulares en presión. Se trata aquí de la distribución de agua potable, de las aguas de riego y de las máquinas hidráulicas que permiten controlar dicha distribución.

En la parte de la hidráulica en lámina libre se trata de las evacuaciones de aguas pluviales, del drenaje de las aguas, de las aguas de riego, de los saneamientos y del medio ambiente.

En este trabajo nos centraremos principalmente en la hidráulica en lámina libre.

I.1 – Generalidades sobre los Canales

I.1.1 - Definición

“Un canal es un conducto natural o artificial por donde fluye un líquido valiéndose únicamente de la acción de la fuerza de gravedad. Se caracteriza por presentar una superficie libre expuesta a presión atmosférica” [1].

“Canales son obras hidráulicas lineales que transportan agua en superficie libre” [2].

I.1.2 - Tipos de canales

Los canales se clasifican en 2 tipos según que sean naturales o artificiales [2].

Los canales naturales son: ríos, corriente de agua y torrentes

Los canales artificiales son: canales de suministro, drenaje, riego, evacuación de aguas pluviales y residuales y de navegación.

I.1.3 – Características geométrico-hidráulicas de los canales y de una sección transversal de un canal

Esas características permiten conocer a todos los elementos que constituyen un canal y poder hacer la diferencia entre los parámetros geométricos que definen la forma del canal y los parámetros hidráulicos del canal.

I.1.3.1 – Tramo de canal prismático

Un tramo de canal prismático es “un tramo de traza rectilínea y pendiente longitudinal constante en el que la forma, dimensiones y características de la sección transversal permanecen invariables” [3,4].



Figura I.1: Tramo de canal prismático [3].

En la figura (I.1) observamos un canal dónde están representados un tramo de canal prismático y su sección transversal.

Si se desplaza el agua de un extremo al otro en el interior de un canal es como consecuencia de la presencia de una pendiente longitudinal que en este caso está representado en el mismo sentido que la línea recta del tramo prismático. La curva por su parte representa una sección transversal del canal. Todo esto se resume en la figura (I.2) siguiente:

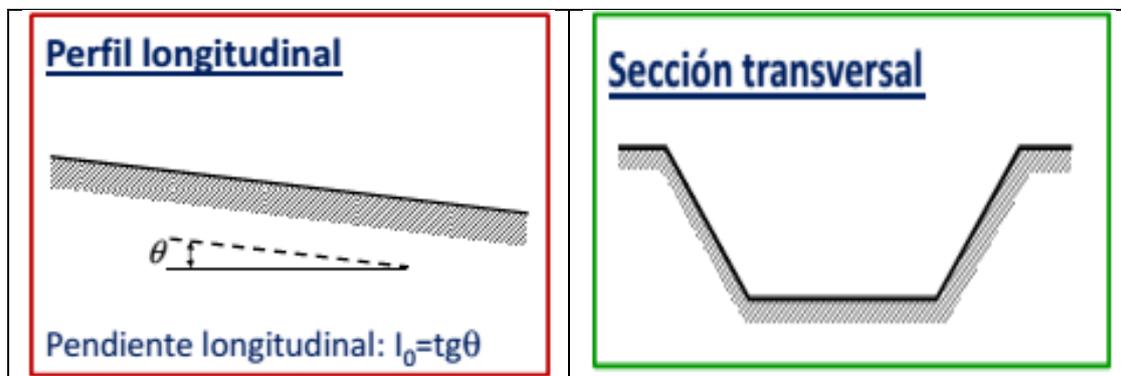


Figura I.2: Izquierda: perfil longitudinal de un canal, Derecha: sección transversal de un canal [3].

I.1.3.2 – Características geométricas de los canales y de una sección transversal de un canal

Un canal tiene 3 parte esenciales [3]:

- La solera o lecho que es la parte de fondo del canal
- El cajero u margen que son las paredes laterales del canal
- La coronación o banco que es la parte más alta del canal.

La sección transversal de un canal por su parte es una sección plana normal a la dirección del flujo y está compuesta de:

- Ancho de la base (b): distancia de fondo entre los dos cajeros
- Altura de cajeros (h): distancia entre el ancho de la base y la coronación
- Factor de Talud o pendiente lateral (1: z): es el factor que define la inclinación de los cajeros.

I.1.3.3 – Parámetros hidráulicos de los canales y de una sección transversal de un canal

Los parámetros hidráulicos son aquellos que dependen de la cantidad de agua que fluya por el canal. Estos parámetros están representados en la figura (I.3) siguiente:

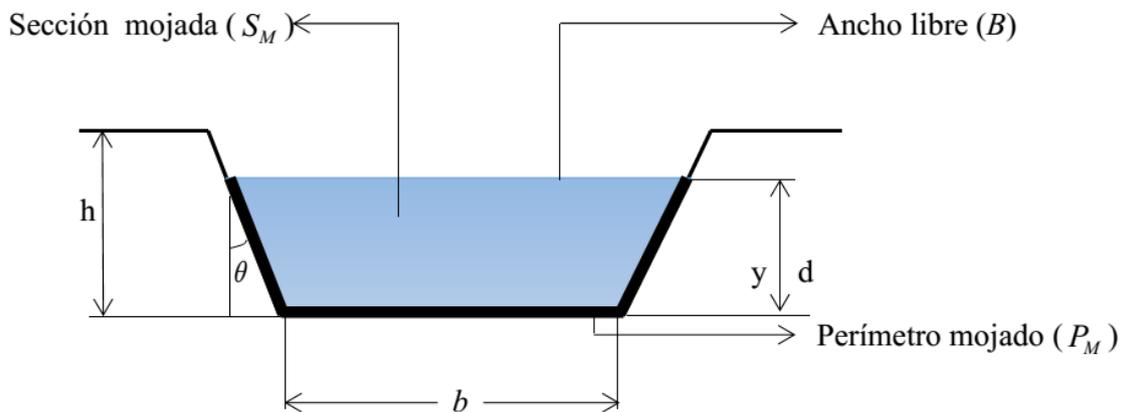


Figura I.3: Parámetros hidráulicos de una sección transversal de un canal.

Los principales parámetros hidráulicos de los canales son [1,2,3,4]:

- La sección mojada (S_M): es la sección ocupada por el agua dentro de la sección transversal.
- El perímetro mojado (P_M): es la línea que pasa por el ancho de base y une los puntos más altos de los cajeros que toca el agua en un canal.
- El radio hidráulico (R_h): es el parámetro utilizado para medir el efecto de forma del canal y es dado por la relación entre la sección mojada y el perímetro mojado su fórmula es:

$$R_h = \frac{S_M}{P_M} \quad (I.1)$$

- Calado de la sección mojada (d): es la distancia entre el punto de menor cota de la solera y la superficie libre, en dirección perpendicular al flujo.
- Profundidad del flujo o calado hidráulico (y): es la distancia vertical a la plantilla, medida desde la superficie libre del agua al punto más bajo de la

sección transversal. Ocasionalmente se le confunde con el calado normal de la sección mojada (d), el cual se mide en forma perpendicular al fondo del canal. Cuando el ángulo θ , que forma la pendiente longitudinal del canal con respecto al plano horizontal de referencia es muy pequeño, el calado hidráulico y se puede considerar igual al calado normal (d). La relación entre ambos calados es:

$$d = \theta \cos(y) \quad (\text{I.2})$$

- Ancho de la superficie libre o espejo (B): es el ancho de la sección de canal medido a nivel de la superficie libre.
- Profundidad hidráulica o calado medio (D): es la relación entre la sección mojada y el ancho de la superficie libre.

$$D = \frac{S_M}{B} \quad (\text{I.3})$$

- Talud (z), es la inclinación de las paredes de la sección transversal y corresponde a la distancia horizontal z recorrida desde un punto sobre la pared, para ascender la unidad de longitud a otro punto sobre la misma, generalmente se expresa 1: z .
- El resguardo (F): es la distancia de cota entre la cota de coronación (Z_c) y la cota de la lámina libre (Z).

I.1.3.3 – Formas de los canales y velocidad media

Según los parámetros hidráulicos y los de la sección transversal existen varias formas de canales [3]: Canales de forma rectangular, triangular, trapezoidal, circular, forma de cuneta poco profunda, naturales de forma irregular.

En realidad en un canal la velocidad no suele ser la misma en todos los puntos, por eso cuando se habla generalmente de velocidad en un canal se refiere a la velocidad media del canal que está dada por la fórmula:

$$V_M = \frac{Q}{S_M} \quad (\text{I.4})$$

Dónde:

V_M es la velocidad media de la sección del canal.

Q es el Caudal que fluya por esta sección de canal.

S_M es la sección mojada de esta parte del canal.

La ecuación de Chézy también nos da la velocidad media del flujo en un canal en régimen uniforme que es [5]:

$$V_M = C\sqrt{R_h I} \quad (I.5)$$

Dónde:

V_M es la velocidad Media.

R_h es el radio Hidráulico de la sección del canal.

I es la pendiente del canal.

C es el coeficiente de resistencia de Chézy

Diferentes fórmulas presentadas expresen el coeficiente de resistencia de Chézy.

I.1.3.4 – Rugosidad de un Canal

Según el diccionario en línea Wikipedia [6]: “la Rugosidad es una característica del estado de superficie de un material sólido, es también un parámetro de un flujo produciéndose sobre este material. Puede tener varias acepciones técnicas pero en hidráulica dentro del estudio de canales en lámina libre es el coeficiente k que intervenga en la fórmula de Manning-Strickler que nos da la expresión de la velocidad media en régimen uniforme. Por ejemplo en un canal cuyo la base es de pendiente conocida y de Radio hidráulico dado”.

El coeficiente C de la ecuación de Chézy ha sido estudiado por varios científicos como se ha dicho antes, y en lo que sigue, presentemos sus valores del coeficiente C .

a) Fórmula de Ganguillet – Kutter

La fórmula fue establecida en 1869 por los ingenieros suizos Ganguillet y W. R. Kutter, se basó en numerosas mediciones, incluyendo el río Mississippi [7].

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R_h}}} \quad (I.6)$$

Dónde:

n es un coeficiente de rugosidad de Kutter

I es la pendiente del canal

R_h es el radio hidráulico

Los valores de n se encuentran en la tabla siguiente:

Superficie	<i>n</i>
Superficie metálica, lisa, sin pintar	0.012
Superficie metálica, lisa, pintada	0.013
Superficie metálica, corrugada	0.025
Cemento liso	0.011
Mortero de cemento	0.013
Madera capillada	0.012
Madera sin capillar	0.013
Tablones sin cepillar	0.014
Concreto liso	0.013
concreto bien acabado, usado	0.014
Concreto frotachado	0.015
Concreto sin terminar	0.017
Gunita (sección bien terminada)	0.019
Gunita (sección ondulada)	0.022
Superficie asfáltica lisa	0.013
Superficie asfáltica rugosa	0.016
Tierra, limpia, sección nueva	0.018
Tierra, limpia, sección antigua	0.022
Tierra gravosa	0.025
Tierra, con poca vegetación	0.027
Tierra, con vegetación	0.035
Tierra, con piedras	0.035
Tierra, con pedrones	0.040
Para secciones circulares (Trabajando como canal)	
Metal, liso	0.010
Acero soldado	0.012
Acero riveteado	0.016
Fierro fundido	0.013 – 0.014
Cemento	0.011 – 0.013
Vidrio	0.010

Tabla I.1: Valores del Coeficiente *n* de Kutter que generalmente se usa en los diseños [7].

b) Fórmula de Kutter

Para pendientes mayores a 0,0005 (1/2000) la fórmula de Ganguillet – Kutter tiene una forma particular establecida por Kutter y que es independiente de la formula (I.6) y es [5,7]:

$$C = \frac{100\sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}} \quad (I.7)$$

Dónde:

m es un coeficiente de rugosidad de Kutter para pendiente mayores a 0,0005.

R_h es el radio hidráulico.

CATEGORIA	FORMA	DESCRIPTION	m
I	Semicircular	Superficie muy lisa. Cemento muy pulido	0.12
II		Superficie bastante lisa. Madera Cepillada	0.15
III	Rectangular y Otras	Superficie bien terminada	0.20
IV		Superficie usada. Tuberías de abastecimiento de agua con mucho tiempo de servicio, pero sin grande incrustaciones	0.25
V		Piedra labrada bien acabada	0.30 – 0.35
VI		Piedra no bien terminada, usada	0.45
VII		Piedra rústica, fondo con poco lodo	0.55
VIII		Piedra mal terminada, fondo fangoso	0.75
IX		Piedra antigua, sin vegetación, fangoso	1.00
Xa	Trapezial	Fondo rocoso. Ancho inferior a 1,50 m. Poca Vegetación	1.25
Xb		Sección definida en tierra sin vegetación	1.50
XIa		En tierra con fondo pedregoso o fangoso. Poca vegetación Ancho superior a 2 m (corresponda a algunos arroyos y ríos)	1.75
XIb		En tierra o piedra, lecho fangoso, con Vegetación abundante (corresponde a algunos arroyos y ríos)	2.00
XII		En tierra con vegetación muy abundante. Con mal mantenimiento, lecho fangoso. Arrastre de fondo	2.5

Tabla I.2: Valores del Coeficiente m de rugosidad a usarse en la fórmula de Kutter para pendiente mayores que 0.0005 [7].

c) Fórmula de Bazin

Esta fórmula fue establecida por Bazin en 1897 [5,7]:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{G}{\sqrt{R_h}}} \quad (I.8)$$

Dónde:

G es el coeficiente de rugosidad de Bazin.

R_h es el radio hidráulico.

CATEGORIA	DESCRIPCION	G
1	Contorno muy liso, perfectamente ejecutado. Plancha metálica. Cemento liso, madera muy cepillada	0.06
2	Contornos lisos. Concreto bien acabado	0.16
3	Concreto sin pulir. Albañilería de piedra bien terminada.	0.46
4	Canales en tierra, sin vegetación	0.85
5	Canales en tierra con hierbas. Ríos de cauce irregular, sin vegetación.	1.30
6	Canales en tierra con vegetación. Fondo de cantos rotados. Canales en tierra muy erosionados e irregulares	1.75

Tabla I.3: Valores del Coeficiente G de rugosidad a usarse en la fórmula de Bazin [7].

d) Fórmula de Manning

Es la fórmula más conocida y empleada en canales. Proviene de considerar que en la fórmula de Chézy el coeficiente C es [7]:

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (I.9)$$

Dónde:

n es el coeficiente de rugosidad de Kutter

R_h es el radio hidráulico.

Introduzcamos (I.9) en la fórmula de Chézy (I.5) y obtenemos la fórmula de Manning [5,7]:

$$V = \frac{\sqrt{I}}{n} R_h^{2/3} \quad (\text{I.10})$$

Y el caudal es:

$$Q = \frac{S_M \sqrt{I}}{n} R_h^{2/3} \quad (\text{I.11})$$

La ecuación de Strickler corresponde en los libros técnicos a la fórmula de Gauckler, quien fue el ingeniero que en 1868 publicó en “Annales de Ponts et Chaussées” es:

$$k = \frac{1}{n} \quad (\text{I.12})$$

Remplazemos la ecuación (I.12) en la ecuación (I.11) y obtenemos la fórmula de Manning-Strickler que es:

$$Q = k S_M R_h^{2/3} \sqrt{I} \quad (\text{I.13})$$

I.1.4 – Tipos de régimen en flujos en lámina libre

Los regímenes en flujos en lámina libre dependen de las características hidráulicas tales el calado de agua y la velocidad en función del tiempo y del espacio.

I.1.4.1 – Variabilidad temporal

El flujo es permanente (o estacionario) si las velocidades V y el calado h no cambian en el tiempo en altura y en dirección [4,5]. En el caso contrario el movimiento es no permanente (variado) pero según Comolet [8]: “los flujos permanentes pueden ser uniformes o variados.”

El flujo en los canales es rara vez permanente. Sin embargo las variaciones temporales están en algunos casos, efectivamente lentos para que el flujo sea visto como una sucesión de régimen permanente [5]. Así podemos entonces definir el régimen casi-permanente que es el régimen al cual se refiere Comolet.

La figura (I.4) ilustra un régimen permanente y un régimen no permanente.

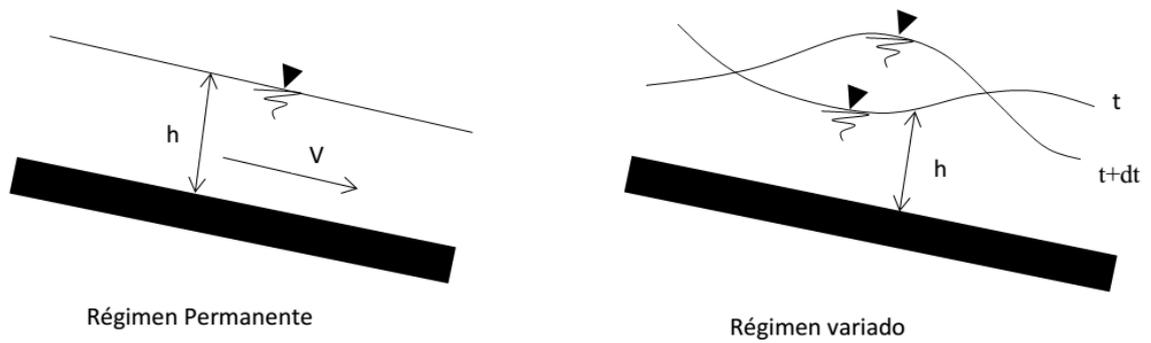


Figura I.4: Esquema de régimen permanente y de régimen no permanente [4,5].

I.1.4.2 – Variabilidad espacial

La variabilidad espacial depende de las características del canal, de la velocidad del flujo y del calado de agua como se resume en la figura (I.5) siguiente:

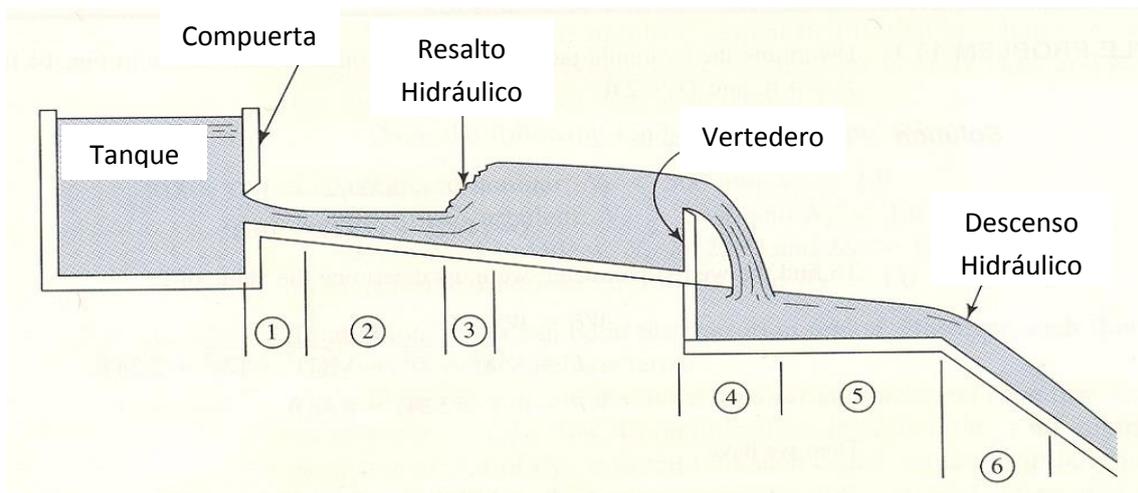


Figura I.5: Esquema de un régimen variable en el espacio.

Sección 1: Flujo rápidamente variado

Sección 2: Flujo gradualmente variado

Sección 3: Resalto hidráulico

Sección 4: Vertedero y caída hidráulica

Sección 5: Flujo gradualmente variado

Sección 6: Descenso hidráulico debido a un cambio de pendiente

I.1.4.3 – Influencia de la viscosidad

Los flujos en lámina libre de aplicación práctica son casi siempre turbulentos. La viscosidad es un parámetro importante de los fluidos porque nos permite definir el número de Reynolds que caracteriza la turbulencia. El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad. En los flujos en lámina libre es dado por [3,5]:

$$R_e = \frac{R_h \cdot U}{\nu} \quad (\text{I.14})$$

Dónde:

U : Velocidad media del flujo

R_h : Radio hidráulico

ν : Viscosidad cinemática

En los flujos en lámina libre el régimen viscoso se produzca por los valores del número de Reynolds menor a 500. Este régimen solo se alcanza en canales extremadamente pequeños (\approx mm) o con velocidades muy bajas (\approx mm/s). En estos casos, estas aplicaciones técnicas se limitan casi exclusivamente a la teoría de la lubricación.

Ensayos con varios canales de tamaños grandes parecidos al saneamiento muestran que el flujo es turbulento cuando el número de Reynolds llega a valores mayores a 4000.

Límites:

- Flujo laminar: $R_e < 500$
- Transición: $500 < R_e < 1000$
- Flujo turbulento: $R_e > 1000$

I.1.4.4 – Influencia de la gravedad

Para poder ilustrar la influencia de la gravedad en el flujo en un canal en lámina libre, vamos a presentar una experiencia simple:

Suponemos un tramo de canal prismático con un tirante h y un caudal constante Q y produzcamos una perturbación en su superficie libre.

A nivel de su superficie libre se crean dos ondas (ondas de gravedad). Una onda se propaga hacia aguas abajo y la otra hacia aguas arriba si la velocidad de flujo al interior del canal es menor a la velocidad de la onda; en el caso contrario se propaga hacia aguas abajo.

En el caso que la velocidad del flujo es mayor a la velocidad de la onda c , las condiciones hidráulicas no afectan aguas arriba (Régimen rápido o supercrítico); mientras en el caso contrario tenemos un ascenso de onda que perturba aguas arriba (Régimen lento u subcrítico). La figura (I.6) ilustra la experiencia.

La gravedad tiene una grande influencia porque, nos permite definir el número de Froude que caracteriza el régimen de flujo en lámina libre. El número de Froude es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad en los flujos en lámina libre, se expresa de la forma [3,5]:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y_h}} \quad (\text{I.15})$$

Dónde:

V : Velocidad del flujo

g : Aceleración de la gravedad

y_h : Altura de agua dentro del canal

Se definen una Velocidad crítica V_c y una profundidad crítica y_c por $F=1$ [3,5].

Límites:

- Régimen lento u subcrítico: $F < 1 \Leftrightarrow V < V_c$
- Régimen crítico: $F = 1 \Leftrightarrow V = V_c$
- Régimen rápido u supercrítico: $F > 1 \Leftrightarrow V > V_c$

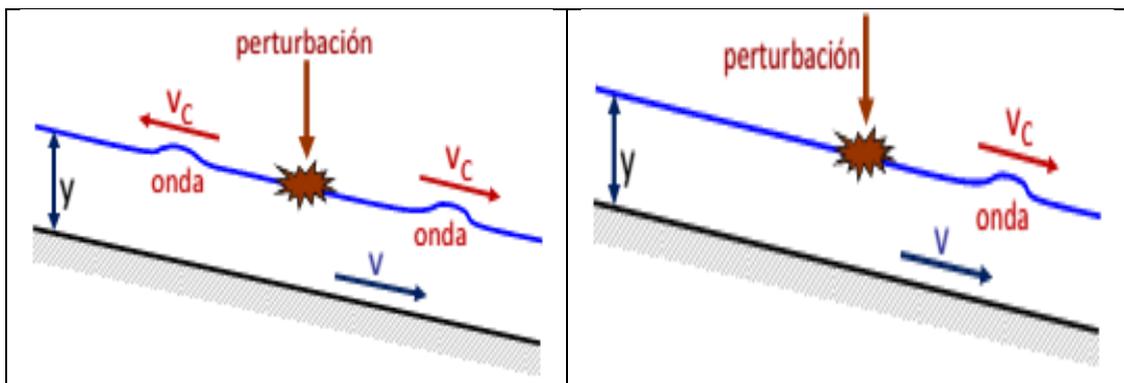


Figura I.6: Izquierda: Caracterización de un régimen subcrítico o lento y Derecha: Caracterización de un régimen supercrítico o rápido [3].

I.1.4.4.1 – Características del Régimen Lento u Subcrítico

Los parámetros que caracterizan un régimen lento o subcrítico son los siguientes:

- $F < 1 \Leftrightarrow V < V_c$
- Las ondas superficiales remontan el flujo
- Las zonas de aguas arriba están en conexión hidráulica con las zonas de aguas abajo
- El flujo está controlado desde aguas abajo

I.1.4.4.2 – Características del Régimen Lento u Supercrítico

Los parámetros que caracterizan un régimen rápido u supercrítico son los siguientes:

- $F > 1 \Leftrightarrow V > V_c$
- Las ondas superficiales no remontan el flujo
- Las zonas de aguas arriba no están en conexión hidráulica con las zonas de aguas abajo
- El flujo está controlado desde aguas arriba.

I.2 – Caracterización de los Vertederos

I.2.1 – Definición

El vertedero ha sido definido por Balloffet como “una abertura o escotadura de contorno abierto, practicada en la pared de un depósito, o bien en una barrera colocada en un canal o río, y por el cual escurre o rebasa el líquido contenido en el depósito, o que circula por el río o canal” [7].

Un vertedero es un obstáculo transversal de geometría y de forma variable que se pone en una estructura hidráulica en lámina libre, por ejemplo un canal, un río u un depósito en fin de regular el nivel del líquido al interior de la estructura y de controlar sus efectos aguas abajo.

Martinez en su memoria de Master [9] nos presenta una definición más descriptiva del vertedero y una gama de clasificación: “Se define como vertedero a un dispositivo hidráulico constituido por una pared perpendicular al flujo, a través del cual se hace circular el fluido. Hidráulicamente es un orificio que no está totalmente ahogado por el nivel de aguas arriba, de manera que la parte del orificio está libre o sea es el equivalente de un orificio sin borde superior.”

I.2.2 – Función de los vertederos

Los vertederos tienen varias funciones siendo las principales [9,10]:

- Controlar el nivel en embalses, canales, depósitos
- Aforo y medición de caudales de pequeños cursos de agua y conductos libres
- Elevar el nivel de agua
- Evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudal (aliviaderos).

Los vertederos cumplen la función de aliviaderos en una presa. Sin embargo son a la vez estructuras que permiten medir caudales.

Los vertederos son utilizados en sistemas de distribución de agua, en saneamientos, sistemas de evacuación de aguas residuales, sistema de control de aguas pluviales, y sistemas de búsqueda hidrológico [11].

I.2.3 – Partes de un vertedero

Las partes de un vertedero son [7]:

- Cresta (L): Borde superior del vertedero
- Contracciones: Lo constituyen los bordes o caras verticales
- Umbral del vertedero (P): es la altura del vertedero desde su base hasta el punto más bajo de salida de agua.
- Longitud del vertedero (B): Es la longitud perpendicular del vertedero con respecto al flujo. Puede ser igual en algunos casos al ancho del canal de acceso.
- Carga (H): Es la altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero.

La figura (I.7) siguiente nos presenta las partes de un vertedero y de la napa vertiente:

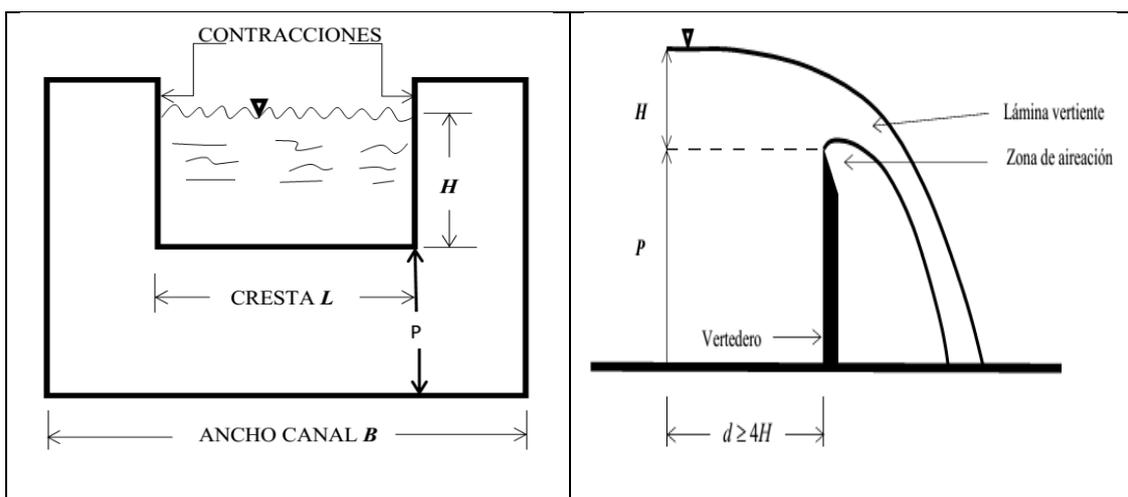


Figura I.7: Partes de un vertedero, Izquierda: Vista frontal, Derecha: Vista lateral [7].

I.2.4 – Clasificación de los vertederos

Los vertederos se clasifican de varias formas como detalladas [9,11]:

a – Clasificación por geometría

Según su geometría tenemos: Vertederos triangulares, rectangulares (sin contracción o con contracciones laterales), trapezoidales, circulares y parabólicos.

b – Clasificación por espesor de la pared

Existen 2 tipos de vertederos según el espesor de la pared: los vertederos de pared delgada ($e \leq 2mm$) y los vertederos de pared gruesa ($e > 0.66H$)

I.2.5 – Estado del arte sobre la caracterización de vertederos

Vertederos son dispositivos útiles y comunes en las mediciones de flujo. Los parámetros esenciales de cada vertedero son: el coeficiente descarga y la altura de agua.

Muchos estudios experimentales se realizaron para caracterizar experimentalmente los vertederos rectangulares, triangulares y trapezoidales de pared delgada.

ARTURO, Rocha 1997 [7] nos presenta las fórmulas de caracterización de vertederos rectangulares sin contracción y con contracciones laterales de Francis (1852), Rehbock (1911), Bazin-Hegly (1921), Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos (1924) y Kindsvater Cater (1959).

GHODSIAN, Masoud, 2004 [12] realizó un estudio teórico basado en la aplicación del análisis dimensional y la aplicación de la teoría de la auto-similitud incompleta junto con una investigación experimental llevada a cabo mediante el uso de un canal de laboratorio para obtener la relación altura-caudal del flujo sobre un vertedero triangular de pared delgada. EL-ALFY, Kassem, 2005 [13] por su parte estudió experimentalmente los efectos de la curvatura vertical de las líneas de corriente de flujo sobre el coeficiente de descarga debido al cambio de la altura del vertedero, para 3 tipos diferentes de vertederos de pared delgada y 1 vertedero de pared gruesa, sin embargo AYDIN, Ismail et al. 2011 [14] condujo un estudio experimental para investigar la hidráulica del flujo sobre vertederos de pared delgada. Buscó una formulación alternativa de datos experimentales para presentaciones simples y compactes. Como se puede ver, las características de los vertederos están estudiadas experimentalmente, por eso RADY, Reda, 2011 [15] señaló que varios intentos se hicieron para estudiar en detalle el flujo a través de diferentes formas de vertederos convencionales normales incluyendo aquellos con pared delgada, vertederos laterales y vertederos oblicuos, basados principalmente en el trabajo experimental. Por el contrario, pequeños esfuerzos se hicieron para utilizar modelos numéricos en la investigación de las características de flujo y distribución de la presión sobre estos tipos de presas. RADY estudió entonces el flujo sobre un vertedero rectangular de pared delgada y proporcionó un medio para estimar su coeficiente de

descarga. BAUTISTA Capetillo et al. [16] por su parte utilizó una técnica fotográfica de baja velocidad para caracterizar los perfiles superior e inferior del calado de flujo sobre un vertedero triangular aireado. ARVANAGHI y OSKUEI, 2013 [10] realizaron experimentos de laboratorio sobre 3 vertederos rectangulares de pared delgada de alturas diferentes montados en un canal de flujo. Representaron los perfiles de superficie libre, las velocidades de flujo y sacaron el coeficiente de descarga del vertedero y después utilizaron el software comercial de CFD Fluent v.6.2 para simular numéricamente el flujo.

En este trabajo, caracterizamos la relación Altura de agua- Caudal del flujo para 3 tipos de vertederos de pared delgada: triangular, rectangular y trapezoidal, mediante técnicas CFD en este caso: una modelación numérica en el software ANSYS R15.0 Académic, una experimentación de laboratorio para validar los resultados y unas simulaciones en SMWW 5 para validar el comportamiento. Presentamos entonces una forma sencilla para encontrar la altura del agua dentro del canal, basado el modelo de Volumen de Fluido para encontrar la superficie libre que es la interface agua-aire.

I.2.4 – Formulas teóricas de descarga de los vertederos

El manual de hidráulica de tuberías y de canales de ARTURO, Rocha 1997 [7] y algunos papeles publicados nos proporcionan las formulas teóricas de descarga de los vertederos y nos enseña cómo encontrar las.

I.2.4.1 – Vertederos rectangulares

La fórmula general de descarga de los vertederos rectangulares es [16,17,18]:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_D L H^{\frac{3}{2}} \quad (I.16)$$

Con:

Q : caudal en m^3/s

L : la longitud del vertedero (m)

H : la carga sobre el vertedero (m)

C_D : el coeficiente de descarga

Numerosos estudios experimentales intentaron determinar el coeficiente de descarga C_D desde el siglo XIX. De forma general el coeficiente de descarga C_D de un vertedero depende de diferentes factores: carga H , naturaleza de los bordes, altura del umbral, propiedades del fluido.

Respecto a las diferentes condiciones, se investigó experimentalmente el coeficiente de descarga de forma que cada investigación toma en cuenta un campo de aplicación.

Los vertederos rectangulares se reparten en dos grandes grupos: sin contracciones y con contracciones laterales.

Varias fórmulas para caracterizar los vertederos existen, las más conocidas son las siguientes: Francis (1852), Rehbock (1911), Bazin-Hegly (1921), Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos (1924), Kindsvater Carter (1959).

I.2.4.1.1 – Fórmula de Francis

Es en Lowell, Massachussetts entre 1848 y 1852 que en fin de encontrar la expresión del coeficiente de descarga de vertederos de pared delgada, James B. Francis realizó sus experimentos en determinadas condiciones.

Las condiciones límites de sus experiencias son:

Longitud del vertedero $L = 3.05\text{m}$

Carga sobre el vertedero $0.18 \leq H \leq 0.58\text{m}$

Altura del umbral $0.6 \leq P \leq 1.5\text{m}$

Y también $L/H \geq 3$.

La fórmula obtenida por Francis toma en cuenta la velocidad de aproximación V_0 y permite evaluar el caso de contracciones laterales.

La fórmula de Francis es:

$$Q = 1.84 \left(L - \frac{nH}{10} \right) \left[\left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (\text{I.17})$$

En la que:

Q : Caudal en m^3 / s

L : Longitud del vertedero en m

H : La Carga en m

V_0 : La Velocidad de aproximación en m/s

n : se designa al número de contracciones (0,1,2)

Para incluir el efecto de las contracciones, Francis usa un término de reducción de la longitud del vertedero que permite definir la longitud efectiva $\left(L - \frac{nH}{10} \right)$ en función del número n de contracciones.

Para $L \leq 0.2H$, el caudal es cero o negativo.

Si consideramos que la velocidad de aproximación es tan pequeña y que es despreciable, entonces $V_0 = 0$, la fórmula de Francis sería:

$$Q = 1.84 \left(L - \frac{nH}{10} \right) H^{\frac{3}{2}} \quad (I.18)$$

Si no hay ninguna contracción lateral, entonces $n = 0$, la fórmula de Francis será:

$$Q = 1.84 L H^{\frac{3}{2}} \quad (I.19)$$

I.2.4.1.2 – Fórmula de Bazin ampliada por Hégly

Bazin estableció en 1886 una ecuación para el cálculo de la descarga en vertederos rectangulares sin contracciones basada en sus experiencias [7].

Partiendo de los resultados obtenidos por Bazin, en 1921 Hégly publicó una ecuación para el cálculo de la descarga de vertederos rectangulares de pared delgada con contracciones o sin ellas. Esta ecuación es conocida como fórmula de Bazin-Hégly.

Las condiciones límites de aplicación de la fórmula de Bazin-Hégly son:

Longitud del vertedero $0.5 \leq L \leq 2.0$ m

Carga sobre el vertedero $0.1 \leq H \leq 0.6$ m

Altura del umbral $0.2 \leq P \leq 2.0$ m

La fórmula de Bazin-Hégly parte de la ecuación (I.16) de descarga de un vertedero, en la que para un vertedero con contracciones laterales el valor de C_D es:

$$C_D = \left[0.6075 + 0.045 \frac{B-L}{B} + \frac{0.00405}{H} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{L}{B} \right)^2 \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right] \quad (I.20)$$

En la que B es el ancho del canal

Si el vertedero es sin contracciones, entonces $B = L$ y el coeficiente de descarga sería [7,18]:

$$C_D = \left[0.6075 + \frac{0.00405}{H} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right] \quad (I.21)$$

I.2.4.1.3 – Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos

Es en 1924 que se adoptó esta fórmula de descarga para vertederos rectangulares de pared delgada. La fórmula parte de la ecuación (I.16) de descarga de un vertedero.

En esta fórmula también hay dos coeficientes, según que existen contracciones o no.

El coeficiente C_D para un vertedero con contracciones es [7,18]:

$$C_D = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{L}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{L}{B} \right)^2}{1000H + 1.6} \right] \left[1 + \frac{1}{2} \frac{L}{B} \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right] \quad (I.22)$$

B es el ancho del canal.

Los límites de aplicación de esta fórmula para el coeficiente de descarga en vertederos rectangulares con contracciones son:

- Carga sobre el vertedero $\frac{0.025}{L/B} \leq H \leq 0.80 m$
- Longitud del vertedero $L \geq 0.30B m$
- Altura del umbral $P \geq 0.30B$
- $\frac{H}{P} \leq 1$

El coeficiente de descarga C_D para un vertedero sin contracciones es:

$$C_D = 0.615 \left[1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right] \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right] \quad (I.23)$$

La carga H está en metros.

Los límites de aplicación de este coeficiente son:

- Carga sobre el vertedero $0.025 \leq H \leq 0.80 m$
- Altura del umbral $P \geq 0.30m$
- $\frac{H}{P} \leq 1$

I.2.4.1.4 – Fórmula de Kindsvater – Carter

Es una de las fórmulas las más precisas que se aplica a todos los tipos de vertederos rectangulares y es en 1959 que C.E. Kindsvater y R.W. Carter la establecieron.

Su formulación es:

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} (L + K_L) (H + K_H)^{\frac{3}{2}} \quad (I.24)$$

Como se puede ver esta fórmula utiliza longitud efectiva, que es la suma de la longitud L del vertedero más un valor que se encuentra a partir de una expresión K_L obtenida experimentalmente que aparece en el figura (I.8), donde B representa el ancho del canal, y L la longitud del vertedero u la cresta del vertedero..

$K_H = 0.001$ m es un valor que se añade a la carga para formar la carga efectiva.

C_e es el coeficiente de descarga intrínseco de la fórmula, tiene también origen experimental y aparece en la figura (I.9) que presenta los coeficientes de descarga de un vertedero rectangular.

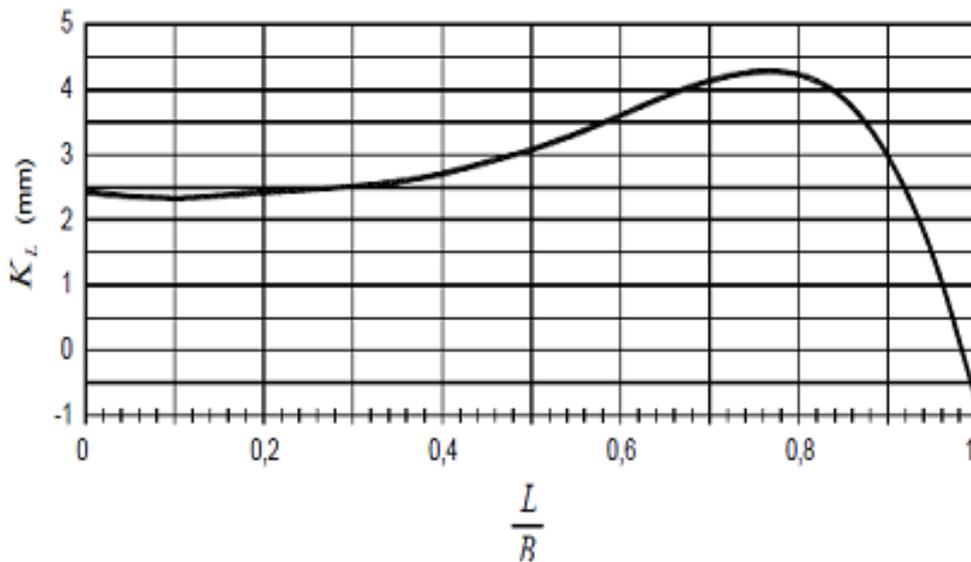


Figura I.8: Gráfico para la determinación de K_L [7].

Entre los requerimientos para una correcta aplicación de la fórmula están los siguientes:

- La carga H debe medirse a una distancia igual a 4 o 5 veces la máxima carga.
- El vertedero debe ser pared delgada. La cresta debe ser de 1 o 2 mm de espesor.
- El nivel de la superficie libre aguas abajo debe estar por lo menos 6 cm debajo de la cresta del vertedero.
- La carga debe ser superior a 3cm. La altura del umbral P debe ser por lo menos de 10cm.
- La longitud del vertedero y el ancho del canal deben ser superiores a 15cm.
- La relación entre la carga H y la altura P del umbral debe ser menor que 2.5.

Si la longitud del vertedero es igual al ancho del canal ($L = B$), entonces no hay contracción, pero debe cumplirse que $B - L \geq 0.2$ m en el caso contrario.

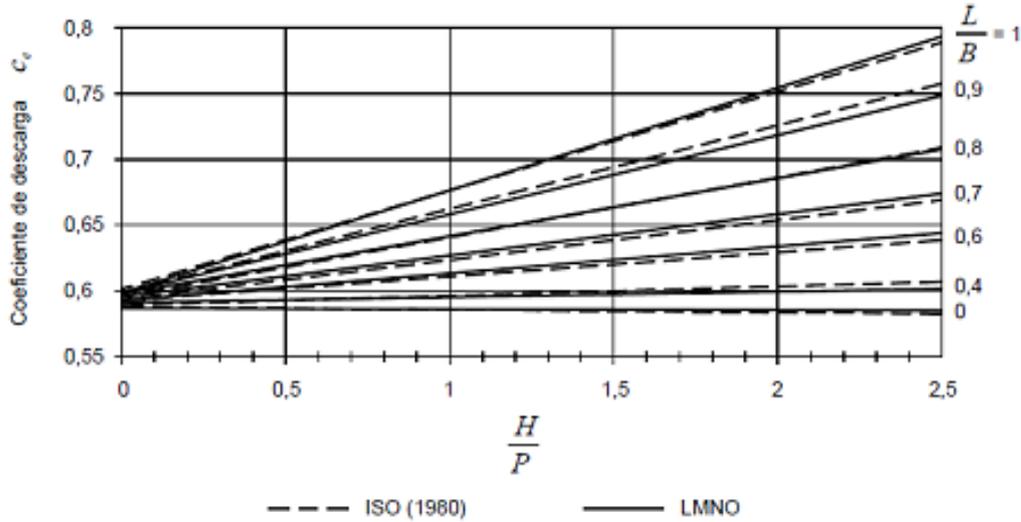


Figura I.9: Coeficiente de descarga de un vertedero rectangular [7].

Según [18] el coeficiente de descarga de Kindsvater y Carter es:

$$C_D = \frac{3}{2\sqrt{2}} 0.554 \left(1 - 0.003 \frac{H}{P} \right) \quad (I.25)$$

Los límites de aplicación de este coeficiente son:

$$H > 0.03 \text{ Montes 1998}$$

$$H \geq 0.03 \text{ Herschy 1998}$$

$$H \geq 0.03 \text{ U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR) 2001.}$$

En 1956, Kindsvater y Carter se dieron cuenta que los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial podrían ser considerables si se aumentaba la altura del vertedero de 0.001 m y se reducía el ancho del mismo de 0.0009 m [17].

La ecuación de este coeficiente de descarga es:

$$C_D = \left(0.611 + 0.075 \frac{H}{P} \right) \left(1 - \frac{0.0009}{B} \right) \left(1 + \frac{0.001}{H} \right) \quad (I.26)$$

En 1972 Sarginson introdujo esta ecuación con corrección del término de la tensión superficial [17]:

$$C_D = 0.613 + 0.0745 \frac{H}{P} + \frac{1.492\sigma}{\rho g H^2} \quad (I.27)$$

Aydin et al. [14] introdujo el concepto de un vertedero de hendidura adecuado para medir pequeñas descargas con alta precisión debido al aumento de la carga sobre el vertedero. La característica más importante de la presa de hendidura es la independencia del coeficiente de descarga de la anchura del canal, B, debido a la naturaleza

completamente contraída del flujo sobre el vertedero. Formulación del coeficiente de descarga se ha mejorado con un mayor rango de datos en un estudio posterior por Aydin et al. como:

$$C_D = 0.562 + \frac{10 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{2H}{b} \right)^2 \right] \right\}^{-1}}{R^{0.45}} \quad (\text{I.28})$$

R : Numero de Reynolds

b : Distancia entre las dos paredes de contracción del vertedero

I.2.4.1.4 – Fórmula de Rehbock

En 1911 en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe, Rehbock realizó con gran precisión varias experiencias con el objetivo de reducir los efectos de la condiciones de aproximación sobre los vertederos rectangulares [7,14].

Su fórmula presentada en 1929 para expresar el coeficiente de descarga C_D de vertederos rectangulares de pared delgada sin contracciones que se aplica a la ecuación (I.16) es:

$$C_D = \left[0.6035 + 0.0813 \frac{H}{P} + \frac{0.00009}{P} \right] \left[1 + \frac{0.0011}{H} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.29})$$

H y P están en metros. La recomendación es usar la fórmula para $0.025 \leq H \leq 0.60$ m.

Tomando en cuenta los efectos de tensión superficial, Rehbock (1929) propuso la formula siguiente [17]:

$$C_D = 0.611 + 0.075 \frac{H}{P} + 0.36 \left(H \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}} - 1 \right)^{-1} \quad (\text{I.30})$$

Con el fin de introducir los efectos de la viscosidad y de la tensión de superficie la ecuación ha sido escrita así [17]:

$$C_D = 0.611 + 0.075 \frac{H}{P} + k_1 \left(k_2 \frac{gH^2}{\nu} \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}} - 1 \right)^{-k_3} \quad (\text{I.31})$$

Dónde k_1 , k_2 y k_3 son constantes de corrección.

I.2.4.2 – Vertederos triangulares

Los vertederos triangulares se usan para medir caudales pequeños.

La fórmula general de descarga de los vertederos triangulares de un ángulo dado y para coeficiente C_D tiene como expresión [7,13,16]:

$$Q = KH^{\frac{5}{2}} \quad (I.32)$$

Siendo,

$$K = C_D \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} \quad (I.33)$$

O bien,

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_D \tan \alpha H^{\frac{5}{2}} \quad (I.34)$$

Las ventajas de los vertederos triangulares pueden ser las siguientes:

- Permite obtener alta precisión en la medida de caudales pequeños.
- Influencia reducida de la altura del umbral y de la velocidad de llegada.

Se debe cumplir la relación siguiente:

$$B \geq 5H \quad (I.35)$$

Los vertederos triangulares tienen la forma de V. Por esta razón se les llama V-notch. Aguas arriba, los vertederos triangulares son muy sensibles a la rugosidad del medio característico y para cargas pequeñas también influyen la viscosidad y la capilaridad.

El coeficiente de descarga de vertederos triangulares se puede encontrar mediante estudios experimentales y numéricos. Los elementos que le influyen son: el ángulo del vertedero y la carga

Entre 1923 y 1924 en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile, los ingenieros L. Cruz Coke, C. Moya y otros realizaron estudios experimentales del flujo en vertederos triangulares de diferentes ángulos: 15°, 30°, 45°, 60°, 90° y 120°.

Los resultados están representados en la figura (I.10). El coeficiente de descarga C_D está definido por:

$$C_D = \frac{15}{8} m \quad (I.36)$$

La descarga se calcula con la ecuación (I.34). Se determinó como parte del estudio, que los errores no son superiores al 5%.

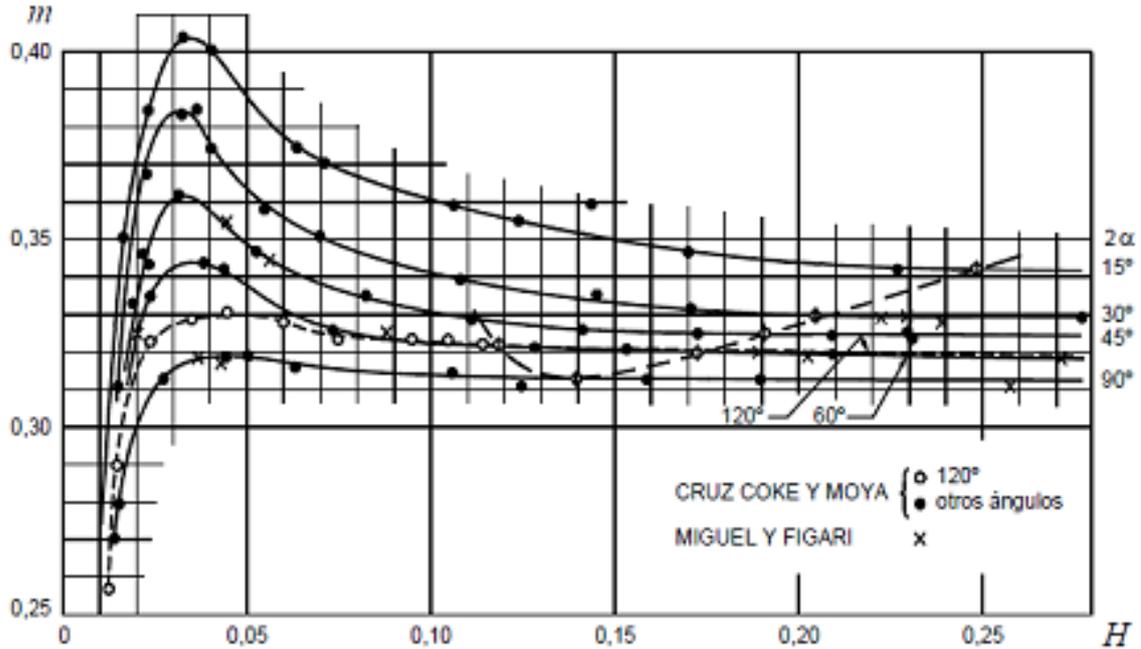


Figura I.10: Coeficiente de descarga en vertederos triangulares [7].

En la Figura (I.10) se observa de forma clara que para cada ángulo el coeficiente m aumenta cuando se va aumentando la carga H . A un cierto valor de la carga logrado entre 3 y 4 cm, el aumento de la carga implica una disminución del coeficiente m . Al final, para valores mayores de la carga se alcanza un valor prácticamente constante. Estos valores casi constantes hacia los que tiende el coeficiente de cada vertedero y las cargas respectivas son para cada ángulo los que se resumen en la Tabla (I.4).

ANGULO (2α)	15°	30°	45°	60°	90°	120°
$H >$	0.25	0.205	0.185	0.17	0.14	0.12
m	0.343	0.33	0.325	0.32	0.313	0.322
C_D	0.643	0.619	0.609	0.6	0.587	0.604
K	0.2	0.392	0.596	0.818	1.386	2.471

Tabla I.4: Coeficientes en vertederos triangulares de Coke [7].

Una aplicación simple de la tabla (I.4) nos permite obtener ecuaciones simples para los vertederos triangulares de un cierto ángulo.

En 1861, James Thomson realizó experiencias con vertederos triangulares en el que la carga se logró entre 5 y 18 cm. Su fórmula para vertederos triangulares de $2\alpha = 90^\circ$ es muy famosa.

En 1908, James Barr amplió por experimentación la fórmula de Thomson de manera que la carga alcanzó $H = 30$ cm. La fórmula es:

$$Q = 1.4H^{\frac{5}{2}} \quad (I.37)$$

Que es conocida como fórmula de Thomson para vertederos triangulares de 90° .

H : la carga está en metros (m)

Q : el caudal está en (m^3/s)

Basando se sobre las mediciones de Thomson y Barr, M. A. Barnes presentó la formula siguiente:

$$Q = 1.37H^{2.48} \quad (I.38)$$

Las fórmulas de Thomson y de Barnes tienen límites de aplicación por ciertos valores experimentales de la carga H .

I.2.4.3 – Vertederos trapezoidales: Vertedero tipo Cipolletti

Los vertederos trapezoidales son poco usados para medir caudales, la consecuencia es que no hay muchas informaciones sobre sus coeficientes de descarga. Pero según Kassem Salah El-Alfy [13], los vertederos trapezoidales son utilizados para compensar los efectos finales de contracción del vertedero rectangular.

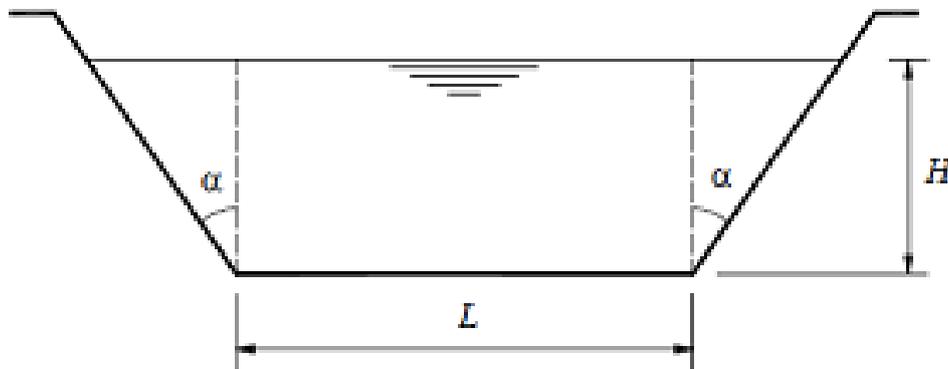


Figura I.11: Esquema de un vertedero trapezoidal [7].

La figura (I.11) representa las características de un vertedero trapezoidal.

Considerando que la sección de un vertedero trapezoidal está compuesta por tres partes: una central que es rectangular y dos laterales que son triangulares. En el caso que las secciones laterales sean simétricas, la descarga en un vertedero trapezoidal es [7,13]:

$$Q = C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} + C_2 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \alpha H^{\frac{5}{2}} \quad (I.39)$$

Se tiene muy poca información experimental sobre los valores de los coeficientes de descarga de los vertederos trapezoidal. Pero según Balloffet, es frecuente considerar $C_1 = C_2 = 0.6$ mientras que no hay justificación teórica o experimental.

En 1887, un ingeniero Italiano del nombre Cipolletti estudió y propuso un tipo particular de vertedero trapezoidal cuyo presentamos las características:

Vertedero de Cipolletti

Es un vertedero trapezoidal de determinadas características geométricas.

La descarga se está formada también de dos partes:

- Una parte a través de la abertura rectangular.
- Otra parte a través de los triángulos.

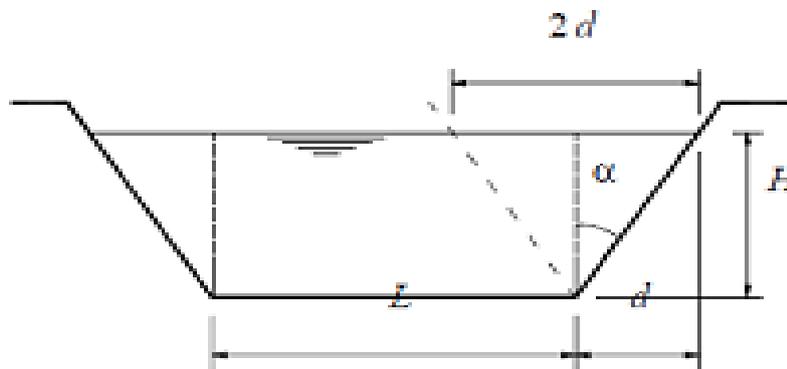


Figura I.12: Características de un Vertedero Cipolletti [7].

La figura (I.12) nos presenta algunas características de un vertedero Cipolletti. Por consideraciones geométricas se cumple que:

$$\tan \alpha = \frac{d}{H} \quad (I.40)$$

Los taludes se deben calcular de manera que la aumentación de la descarga producida por ellos sea exactamente igual a la disminución de la descarga causado por las contracciones en un vertedero rectangular de longitud L . La descarga teórica a través de los triángulos es:

$$Q = \frac{8}{15} d \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.41})$$

La disminución de la descarga en un vertedero rectangular con dos contracciones obtenida a partir de la fórmula de Francis es:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (0.2H) H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.42})$$

Igualando las ecuaciones (I.41) y (I.42) tenemos:

$$\frac{H}{d} = \frac{4}{1} \quad (\text{I.43})$$

Es decir $\tan \alpha = 1/4$ es la condición para que un vertedero sea un vertedero tipo Cipolletti. Esto implica entonces que $\alpha = 14^{\circ} 2'$.

Por experimentación se ha determinado que el coeficiente de descarga de un vertedero Cipolletti es $C_D = 0.63$.

La descarga en un vertedero Cipolletti es equivalente a la descarga de un vertedero rectangular de longitud L , sin contracción, de fórmula de descarga:

$$Q = 0.63 \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.44})$$

L es la base del trapecio.

O bien en el sistema métrico:

$$Q = 1.86 L H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.45})$$

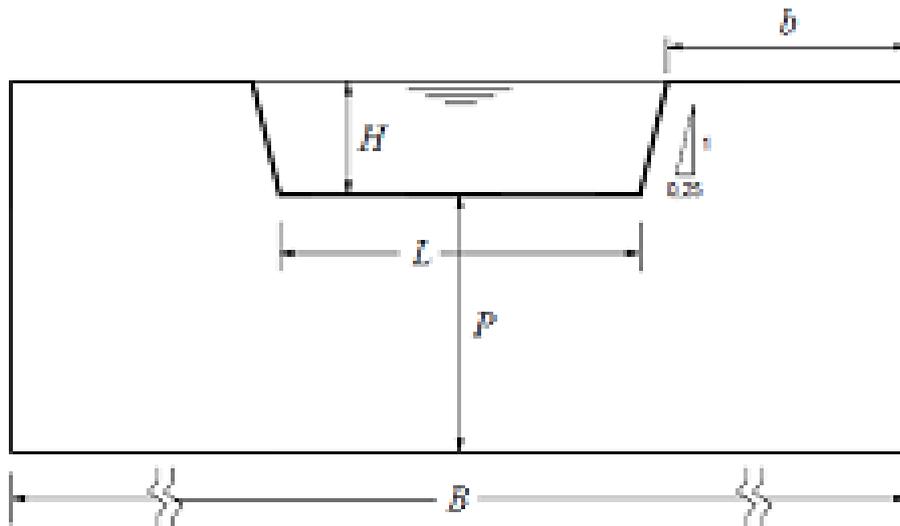


Figura I.13: Vertedero tipo Cipolletti [7].

La figura (I.13) nos enseña las características de un vertedero Cipolletti.

I.2.4.4 – Vertedero de pared gruesa (o de cresta ancha)

En la figura (I.14) está representado un vertedero de cresta ancha en el que la longitud de la cresta, planta y horizontal, es L . El vertedero es de descarga libre, como se puede ver, las condiciones de aguas abajo no le influyen.

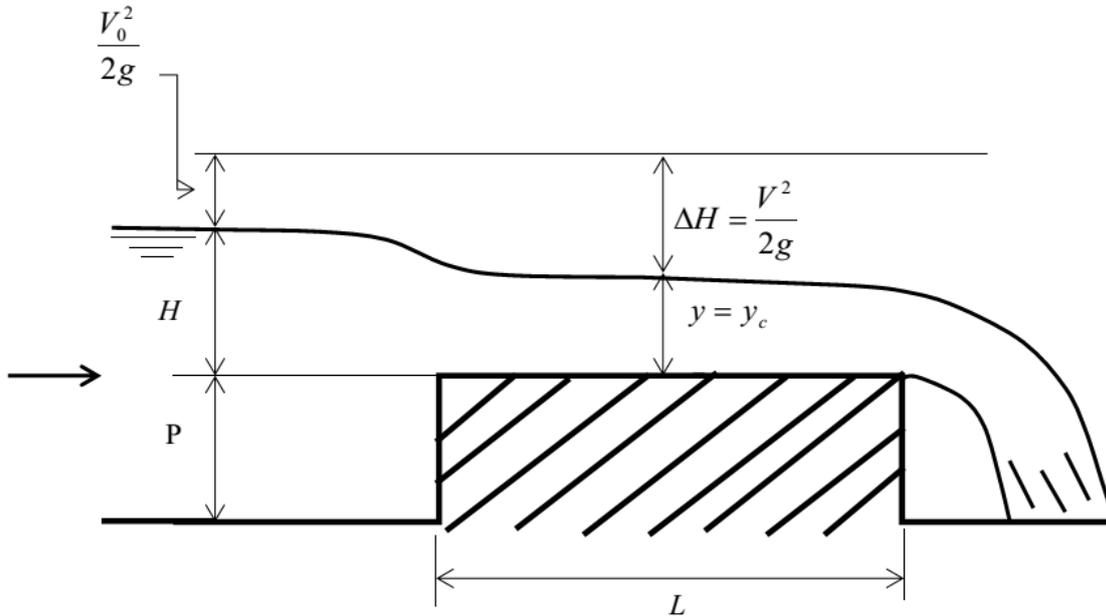


Figura I.14: Perfil Característico de un vertedero en pared gruesa.

Para que un vertedero se comporte como de pared gruesa es necesario que se cumpla esta relación:

$$L \geq \frac{2}{3}H \quad (I.46)$$

Si no se cumple esta condición el vertedero podría ser considerado de pared delgada o de pared intermedia. La longitud máxima de la cresta L debe estar alrededor de $15H$.

En el vertedero de pared gruesa mostrado en la figura (I.14) se puede ver el perfil característico de la superficie libre, la energía específica aguas arriba es $H + \frac{V_0^2}{2g}$. Suponemos que no hay fricción y tampoco pérdidas de carga y que el coeficiente de Coriolis $\alpha = 1$, esta energía tiene que ser igual a la energía sobre la cresta. Por lo tanto:

$$H + \frac{V_0^2}{2g} = y + \frac{V^2}{2g} \quad (I.47)$$

V es la velocidad media del flujo sobre la cresta

ΔH es la diferencia de energía correspondiente.

De la ecuación (I.47) se obtiene que la velocidad media sobre la cresta sea:

$$V = \sqrt{2g \left(H + \frac{V_0^2}{2g} - y \right)} \quad (\text{I.48})$$

Consideramos que el flujo aguas arriba es subcrítico ($F < 1$), entonces el flujo que se desarrolla sobre la cresta del vertedero es crítico porque al final de la cresta la velocidad del flujo aumenta de forma que se produce un flujo supercrítico ($F > 1$).

Si el flujo sobre el vertedero es crítico, $y = y_c$, eso significa que la energía es mínima.

Si se tratase de una sección rectangular de ancho B entonces

$$y = y_c = \frac{2}{3} \left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right) \quad (\text{I.49})$$

Por lo tanto la descarga teórica sobre el vertedero es

$$Q = By_c V = B \frac{2}{3} \left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right) \left[\sqrt{2g \left(H + \frac{V_0^2}{2g} - y_c \right)} \right] \quad (\text{I.50})$$

De donde,

$$Q = \sqrt{g} B y_c^{\frac{3}{2}} = 3.13 B y_c^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.51})$$

Esta fórmula se suele expresar en función de la energía de aguas arriba

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} B \left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.52})$$

Si $V_0 = 0$, la descarga teórica es:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} B H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.53})$$

En sistema métrico la descarga teórica sobre un vertedero rectangular en pared gruesa es:

$$Q = 1.7 B H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.54})$$

La descarga real se obtiene introduciendo en la ecuación (I.54) un coeficiente de descarga C_D .

Por un vertedero en pared gruesa la ecuación del flujo es [19,20,21]:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} C_D B H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.55})$$

Que se reduce a la expresión siguiente [7] :

$$Q = 1.7 C_D B H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.56})$$

I.2.4.5 – Vertedero Laterales: Aliviaderos

Los vertederos laterales son aperturas que se realizan en una de las paredes de un canal. Los vertederos laterales son utilizados para controlar el nivel en sistema de riego y de drenaje. Estas estructuras también se utilizan para desviar el exceso de agua de un canal principal en un canal lateral. El cálculo del perfil de la superficie del agua a lo largo del vertedero lateral es esencial para determinar el alivio sobre el vertedero lateral [7,22,23].

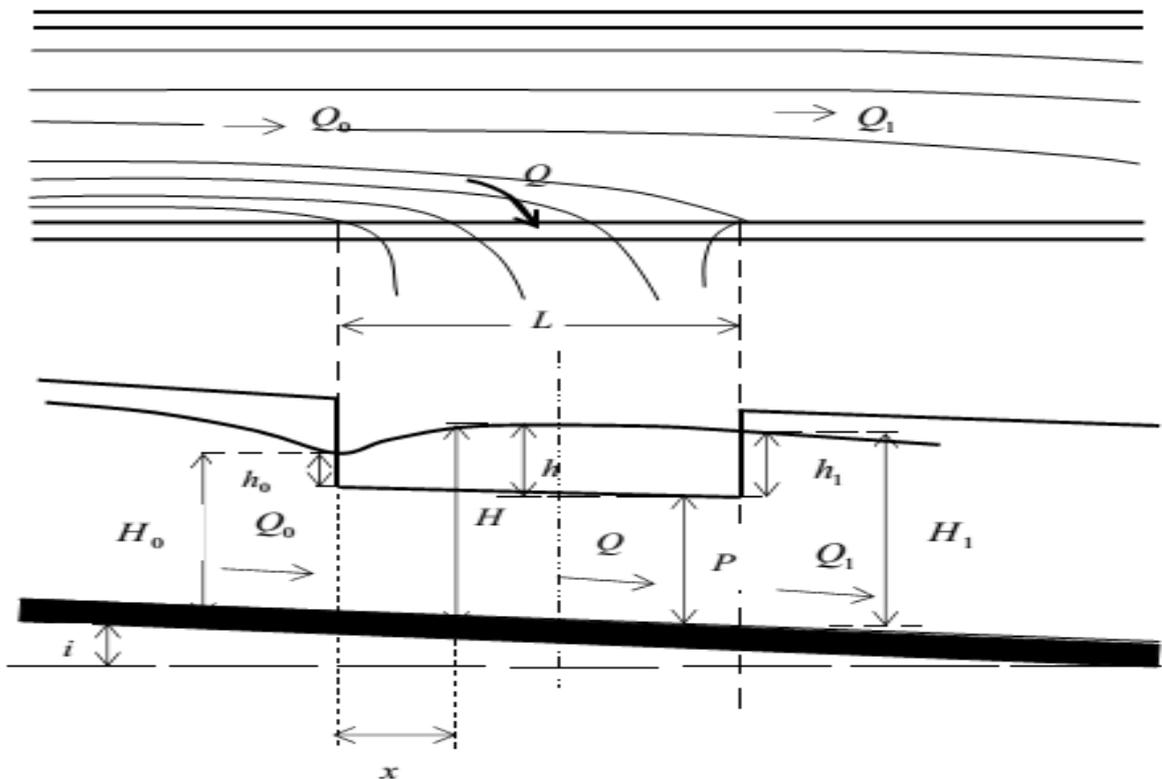


Figura I.15: Características de un Vertedero lateral: Aliviadero.

En la figura (I.15) observamos el esquema característico de un vertedero lateral de umbral P y de longitud L practicado en un canal con flujo subcrítico ($F < 1$). La presencia del vertedero lateral crea un desvío de las líneas de corriente. El caudal de entrada del canal es Q_0 , el caudal aliviado por el vertedero es Q y el resto de caudal que

fluye al interior del canal después de la desviación es Q_1 . Hay que notar que Q es el exceso de caudal que se quiere eliminar del canal.

$$Q = Q_0 - Q_1 \quad (I.57)$$

V_0 es la velocidad correspondiente al caudal Q_0 .

V_1 es la velocidad correspondiente al caudal Q_1 .

H_0 es la carga en el punto inicial del vertedero.

H_1 es la carga en el punto final del vertedero.

H es la carga (variable) en cualquier punto del vertedero a la distancia x del punto inicial.

Aquí se trata de un régimen subcrítico entonces el valor de la carga h va aumentando de H_0 a H_1 en el punto final del vertedero, si se supone que la energía es constante a lo largo de la cresta eso se puede comprobar experimentalmente o teóricamente.

Para determinar el caudal aliviado según [22,23,24] se puede ir de la expresión del perfil de superficie del agua a lo largo del vertedero lateral que puede derivarse de la ecuación de energía de la figura (I.15). En la sección de x , para la distribución hidrostática de presión, y una pequeña pendiente del fondo, la energía específica, E , es:

$$E = y + \frac{\beta Q^2}{2gS^2} \quad (I.58)$$

Con:

y la altura de agua del flujo a la distancia x aguas abajo del vertedero.

β el coeficiente de distribución de la velocidad.

Q el caudal en el canal principal a la distancia x .

S la superficie de la sección transversal.

g la aceleración de la gravedad.

Derivando la ecuación (I.58) al respecto a x y asumiendo $dS/dx = B(dy/dx)$, obtenemos [22]:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{\alpha Q^2 B}{gS^3} \right) + \frac{\alpha Q}{gS^2} \frac{dQ}{dx} \quad (I.59)$$

Dónde:

B es la anchura del canal

Despreciando el efecto de la variación de la energía específica $dE/dx = 0$, a lo largo del vertedero, considerando el vertedero lateral corto con una distribución de presión hidrostática y también que la energía específica es constante a lo largo del vertedero, la ecuación de la descarga a lo largo del vertedero lateral es [22,23,24] :

$$q = -\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_D \sqrt{2g} (y - p)^{3/2} \quad (I.60)$$

Dónde:

q es la descarga por unidad de anchura del vertedero.

P es la altura del vertedero

C_D es el coeficiente de descarga del vertedero.

En la literatura existen varias expresiones del coeficiente de descarga de vertederos laterales.

Conclusión

Llegado al final de este capítulo dónde hemos presentado las nociones principales sobre los canales y hemos caracterizado los vertederos, podemos decir que a la vista del gran número de las fórmulas de obtención de la descarga en función de la carga sobre el vertedero y del coeficiente de descarga no sabemos que formulación usar. Algunas fórmulas caracterizan bien los vertederos pero tienen limitaciones en cuanto al tamaño de los vertederos. Es el caso por ejemplo de la fórmula de la sociedad suiza de Ingenieros y Arquitectos y la carga mínima es el caso por ejemplo de las fórmulas de vertederos triangulares de la Tabla (I.4). De todo lo que precede, podemos así decir que para modelizar perfectamente el comportamiento de cualquier tipo de vertedero es necesario un análisis experimental o bien un análisis mediante técnicas CFD.

CAPITULO II: METODOLOGÍA DE TRABAJO Y ANÁLISIS DE VERTEDEROS MEDIANTE TÉCNICAS CFD

II.1 – Metodología de Trabajo

Puesto que el objetivo de nuestro trabajo es de caracterizar los vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD, hemos elegido una metodología que cuenta varias etapas para asegurar nos que los resultados obtenidos al final serán buenos:

II.1.1 – Análisis mediante técnicas CFD del comportamiento de los vertederos.

La primera etapa de este trabajo consiste en el análisis mediante técnicas CFD del comportamiento de diferentes vertederos de pared delgada.

El software de CFD que hemos usado es ANSYS R15.0 Academics.

3 geometrías de vertedero de pared delgada han sido elegidas: un vertedero triangular, un vertedero rectangular y un vertedero trapezoidal.

Estas geometrías fueron elegidas porque son las que después podemos validar en laboratorio.

II.1.2 – Validación experimental del comportamiento de los vertederos.

La segunda etapa consiste en la validación experimental del comportamiento de los vertederos. Esta etapa ha sido realizada en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

II.1.2.1 – Descripción del Dispositivo experimental



Figura II.1: Dispositivo experimental, Izquierda: Vista frontal Derecha: Vista superior

La figura (II.1) nos presenta el dispositivo experimental cuyas características son:
 Un canal prismático rectangular de ancho de base $B=0.206\text{ m}$ y de altura $H= 0.2\text{ m}$, su longitud es de $L=2\text{ m}$ y su pendiente es $i=3.5\%$ y su coeficiente de Manning es $n=0.013$.
 Aguas arriba hay un tanque que permite que suba el agua y entre dentro del canal de forma estacionaria o suave mientras que el flujo sea turbulento.
 Aguas abajo hay un otro tanque dónde cae el agua que fluye por el canal y atraviesa el vertedero colocado al final del canal. Este tanque está conectado a un sistema de bombeo que impulsa el agua que hacia el tanque de aguas arriba a través de una tubería sobre el cual está montado un caudalímetro.
 Una regla está montada en la pared del canal cerca del vertedero y permite registrar el nivel de agua dentro del canal en función del caudal de entrada.

II.1.2.2 – Características de los 3 vertederos: Triangular, rectangular y trapezoidal

Para realizar el ensayo de laboratorio se han montado 3 tipos de vertederos: triangular, rectangular y trapezoidal al final del canal. Hay también que notar que las características de estos vertederos son las mismas que aquellas utilizadas en ANSYS y en SWMM.
 La figura (II.2) y la tabla (II.1) nos enseñan esas características:

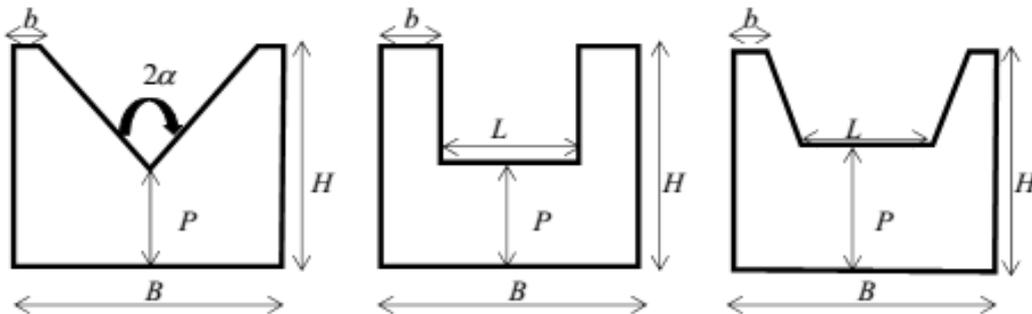


Figura II.2: Características geométricas de los vertederos del estudio

Distancias y Angulo en (m)	Forma del Vertedero		
	Triangular	Rectangular	Trapezoidal
b	0.007	0.063	0.015
B	0.206	0.206	0.206
H	0.2	0.2	0.2
P	0.105	0.1	0.1
2α	90°		
L		0.08	0.1

Tabla II.1: Características geométricas de los vertederos del estudio

II.1.2.3 – Metodología experimental

El procedimiento de operación es lo más sencillo posible, de manera que en menos de 15 minutos, alguien que nunca ha manejado el dispositivo puede estar entrenado y hacer las medidas. El dispositivo está siempre listo para funcionar. Las etapas que hemos seguido son las siguientes:

- Se coloca el vertedero, por ejemplo el vertedero triangular al final del canal.
- Se enciende la bomba y se ajusta la válvula reguladora de caudal. Hay que esperar unos minutos mientras se llena el canal de agua y el flujo se estabiliza.
- Se ponen en marcha el caudalímetro y el cronómetro de manera sincronizada: cada vez que se registra un pulso, eso significa que 10 litros de agua han pasado por el caudalímetro, también se registra el tiempo necesario para obtener el pulso. El caudal se obtiene haciendo la división del volumen de agua por el tiempo.
- Se registra también la altura de agua dentro del canal usando la regla colocada en la pared como ilustrado en la figura (II.3).
- El paso siguiente es el nuevo ajuste de la válvula reguladora de caudal y el ciclo empieza de nuevo.

En nuestro caso, para tener resultados fiables, las medidas se hicieron en 2 sentidos: del caudal más bajo (aceptable) hasta caudal más alto (Válvula reguladora de caudal completamente abierta) y del caudal más alto (Válvula reguladora de caudal completamente abierta) hasta el caudal más bajo (aceptable). Eso, por los 3 tipos de vertederos ensayados.

II.1.2.4 – Visualización de la lámina de Agua

Las imágenes siguientes presentan los resultados de la visualización del nivel de agua de la experimentación en laboratorio:



Figura II.3: Izquierda: Vista frontal de la lámina de agua, vertedero triangular.
Derecha: Lectura del nivel de agua dentro del canal.



*Figura II.4: Izquierda: Vista frontal de la lámina de agua, vertedero rectangular.
Derecha: Lectura del nivel de agua dentro del canal.*



*Figura II.5: Izquierda: Vista frontal de la lámina de agua, vertedero trapezoidal.
Derecha: Lectura del nivel de agua dentro del canal.*

La figura (II.3), la figura (II.4) y la figura (II.5) presentan la lámina de agua en el interior del canal por los vertederos triangular, rectangular y trapezoidal durante los ensayos de laboratorio. Las imágenes de izquierda representan la vista frontal del canal y las imágenes de derecha ilustran la lectura de la altura de agua como descrito en la metodología experimental.

II.1.3 – Comparación de los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura

Una vez los ensayos de laboratorio de los 3 tipos de vertederos realizados, los resultados obtenidos nos han permitido dibujar las curvas características de alturas – caudales de

agua de la experimentación junto con las curvas disponibles en la literatura, a fin de poder compararlas.

Esta comparación nos va a permitir saber qué ecuaciones teóricas mejor se acercan a nuestro modelo experimental y sobre todo el coeficiente de descarga.

II.1.4 – Aplicación de los resultados al modelo SWMM 5

Los resultados obtenidos están en seguida aplicados al modelo SWMM 5. El modelo de estudio en SWMM 5 se encuentra en la figura siguiente:

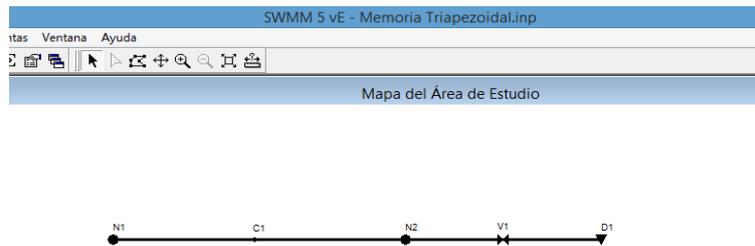


Figura II.6: Esquema del modelo de estudio en SWMM

La figura (II.6) representa el modelo de estudio en SWMM5 cuyo la composición es:

- Un Nudo N1 por dónde ingresa un caudal constante (entrada), su cota de fondo es $Z=0.21m$, dato calculado en función de la pendiente y de la longitud del canal.
- Un Canal C1 de forma rectangular, de longitud $L=6m$, de Altura $H=0.2m$, de Ancho de Base $B=0.206m$, su coeficiente de rugosidad en la ecuación de Manning es $n=0.013$, su pendiente es $i=3.5\%$, su cota de fondo aguas arriba es $Z=0.21m$ y aguas abajo $Z=0m$.
- Un Nudo N2 Conectado aguas abajo del Canal C1 de cota de fondo $Z=0m$. Es en este punto que está conectado el vertedero.
- Un Vertedero V1 cuyo las características se encuentran en la Tabla (II.1) y en la figura (II.8).
- Un vertido D1 (salida) de cota de fondo $Z=0m$, de tipo libre y su nivel de vertido es $Z=0m$.

En el software SWMM 5 existen 4 tipos de vertederos [25]:

Transverse que corresponde a un vertedero rectangular, su fórmula de descarga es:

$$Q = C_w LH^{3/2} \quad (II.1)$$

V-notch que corresponde a un vertedero triangular, su fórmula de descarga es:

$$Q = C_w SH^{5/2} \quad (\text{II.2})$$

Trapezoidal que corresponde a un vertedero trapezoidal, su fórmula de descarga es:

$$Q = C_w LH^{3/2} + C_{ws} SH^{5/2} \quad (\text{II.3})$$

Side Flow que corresponde a un vertedero lateral de forma rectangular, su fórmula de descarga es:

$$Q = C_w LH^{5/3} \quad (\text{II.4})$$

Dónde:

L es la longitud del vertedero

H es la carga

S es la pendiente de lado del vertedero triangular o del vertedero trapezoidal

C_w es el coeficiente de descarga del vertedero

C_{ws} es el coeficiente de descarga a través de los lados de un vertedero trapezoidal.

En el capítulo I de este trabajo hemos presentado las ecuaciones generales de los vertederos rectangulares, triangulares, trapezoidales y laterales. Para encontrar las relaciones que existen entre los coeficientes de descargas reales y los coeficientes de descargas en SWMM 5 vamos a ir igualando estas ecuaciones de descarga reales con las ecuaciones de descarga de SWMM 5.

Haciendo eso, obtenemos las diferentes relaciones:

Vertedero rectangular:

$$C_w = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_D \quad (\text{II.5})$$

Vertedero triangular:

$$C_w = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_D \quad (\text{II.6})$$

Los coeficientes de descargas obtenidos experimentalmente o mediante simulaciones computacionales pueden ser aplicando a un modelo SWMM 5 gracias a la conversiones que nos proporcionan las ecuaciones (I.5) y (I.6).

En el modelo SWMM 5, los datos siguientes son entrados para poder hacer la simulación:

Nudo N1		Nudo N2	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Nombre	N1	Nombre	N2
Coordenada X	-1413.969	Coordenada X	3543.441
Coordenada Y	7597.956	Coordenada Y	7597.956
Descripción		Descripción	
Marca		Marca	
Aportes	YES	Aportes	NO
Tratamiento	NO	Tratamiento	NO
Cota del fondo	0.21	Cota del fondo	0
Profundidad Máxima	0	Profundidad Máxima	0
Nivel inicial	0	Nivel inicial	0
Altura de Sobrepres	0	Altura de Sobrepres	0
Área de inundación	0	Área de inundación	0
Nombre asignado por el usuario a la conexión		Nombre asignado por el usuario a la conexión	

Conducto C1		Vertido D1	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Nombre	C1	Nombre	D1
Nudo inicial	N1	Coordenada X	6763.203
Nudo final	N2	Coordenada Y	7597.956
Descripción		Descripción	
Marca		Marca	
Forma	RECT_OPEN	Aportes	NO
Altura (Prof. Máx.)	0.2	Tratamiento	NO
Longitud	6	Cota del fondo	0
Coef. Manning (n)	0.013	Compuerta antirretorno	NO
Desnivel Entrada	0	Tipo	FREE
Desnivel Salida	0	Vertido a nivel fijo	
Caudal inicial	0	Nivel fijo Vertido	0
Caudal máximo	0	Vertido contra mare	
Coef. Pérd. Entrada	0	Nombre Curva Ma*	
Coef. Pérd. Salida	0	Vertido variable en	
Coef. Pérd. Medio	0	Nombre asignado por el usuario al vertido	
Compuerta antirretorno	NO		
Código Paso Inferio			
Pulsar para editar la geometría de la sección transversal del conducto			

Figura II.7: Características de los elementos del modelo de estudio en SWMM

La figura (II.7) nos enseña los datos respectivos de los Nudos N1 y N2, del Conducto C1 y del vertido D1 tal y como se entraron en el software SWMM para hacer las simulaciones. Hay que notar que la longitud del conducto C1 es el único parámetro que ha sido cambiado.

Vertedero V1		Vertedero V1		Vertedero V1	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Nombre	V1	Nombre	V1	Nombre	V1
Nudo inicial	N2	Nudo inicial	N2	Nudo inicial	N2
Nudo final	D1	Nudo final	D1	Nudo final	D1
Descripción		Descripción		Descripción	
Marca		Marca		Marca	
Tipo	V-NOTCH	Tipo	TRANSVERSE	Tipo	TRAPEZOIDAL
Altura	0.095	Altura	0.1	Altura	0.1
Longitud	0.192	Longitud	0.08	Longitud	0.176
Pendiente lateral	0	Pendiente lateral	0	Pendiente lateral	0.38
Altura de cresta	0.105	Altura de cresta	0.1	Altura de cresta	0.1
Coefficiente de descarga	1.78	Coefficiente de descarga	2.0	Coefficiente de descarga	1.34
Compuerta antirretorno	NO	Compuerta antirretorno	NO	Compuerta antirretorno	NO
Contracciones	0	Contracciones	0	Contracciones	0
Coefficiente de bord	0	Coefficiente de bord	0	Coefficiente de bord	0
Tipo de vertedero		Tipo de vertedero		Tipo de vertedero	

Figura II.8: Características de los vertederos del modelo de estudio en SWMM

La figura (II.8) nos enseña los datos respectivos de los Vertederos triangular, rectangular y trapezoidal tal y como se entraron en el software SWMM 5 para hacer las simulaciones. Hay que notar que los coeficientes de descargas del modelo SWMM 5 no son los coeficientes de descarga que se meten directamente en las formulas teóricas. Sin embargo, existen ecuaciones que les ligan.

Los elementos del Modelo de simulación en SWMM 5 son los siguientes:

- Modelo Hidráulico de transporte: Onda dinámica
- Final de Análisis: 12:00 horas
- Transporte: 01 segundo
- Términos inerciales: Suavizar
- Definición de Flujo Supercrítico: Ambos

Los resultados de simulaciones en SWMM 5 también están presentados.

II.2 – Análisis de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD

Cualquier proceso de análisis mediante técnicas CFD tiene 4 fases: La definición de la geometría, después, la generación de la malla y la definición de las condiciones límites del modelo, seguido por la calibración del solver de cálculo según el modelo para resolución del problema y en fin el post tratamiento: procesamiento de datos numéricos. La figura (II.9) siguiente nos presenta claramente las fases del proceso de análisis mediante técnicas CFD.

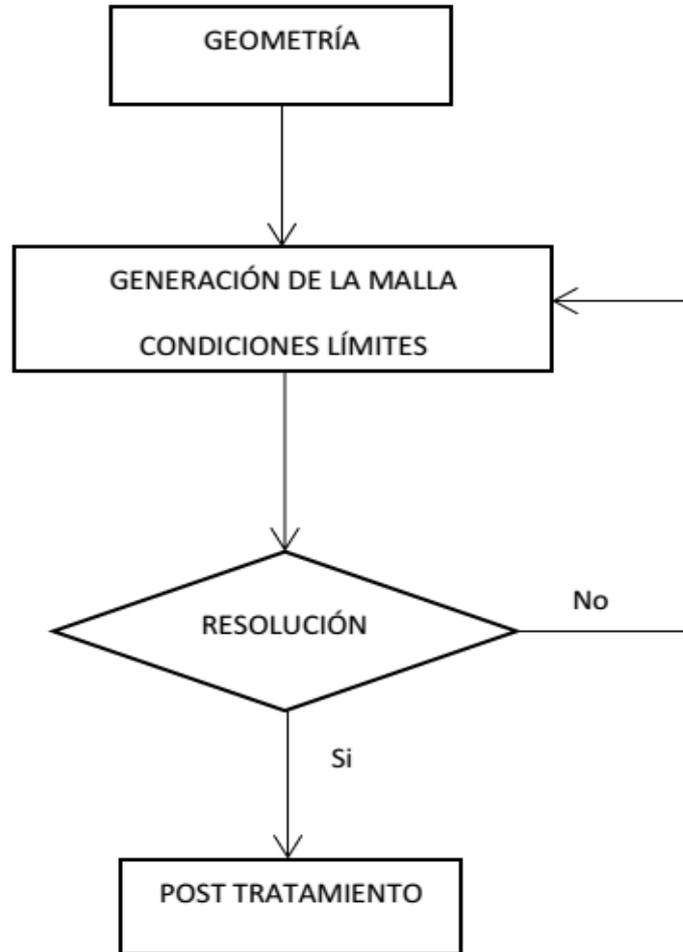


Figura II.9: Esquema de las fases de un proceso de análisis mediante técnicas CFD

II.2.1 – Definición la Geometría

Las geometrías empleadas para realizar nuestro trabajo son los 3 tipos de vertederos y un canal rectangular como se puede ver en la figura (II.10)

Puesto que el modelo es simétrico y que trabajamos con una versión ANSYS de aprendizaje que tiene algunos límites en cuanto al número de celdas, lo que hemos hecho es trabajar con la mitad de nuestro canal que tiene las características siguientes:

Canal prismático rectangular de ancho de base $B=0.103\ m$ y de altura $H= 0.3\ m$, su longitud es de $L=2.05m$ y su pendiente es $i=3.5\%$.

La figura (II.10) siguiente nos presenta nuestro modelo de canal en ANSYS R15.0 Academic que nos ha permitido hacer las simulaciones numéricas:

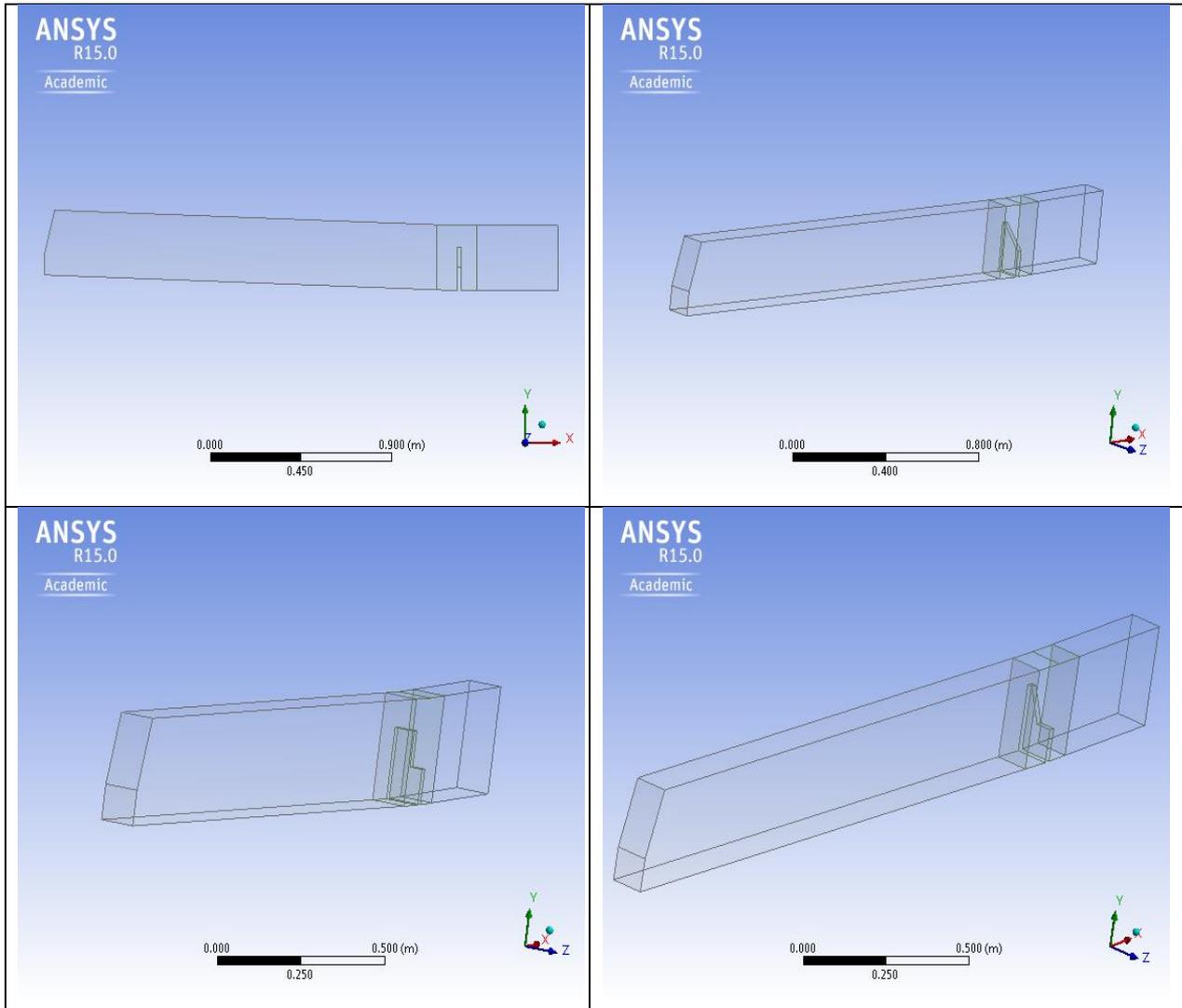


Figura II.10: Geometría del modelo numérico del canal con los diferentes vertederos en ANSYS R15.0 Academic

II.2.2 – Generación de la Malla

Como se comentó antes la versión ANSYS R15.0 Academic tiene ciertos límites en cuanto al número de elementos que puede tener un modelo.

Para hacer un trabajo costoso como este, se necesitan más elementos. En realidad, la malla tiene un papel imprescindible en la obtención de soluciones precisas y estables en los estudios CFD, porque los algoritmos de cálculo de modelos CFD están diseñados para buscar soluciones eficientes en elementos o volúmenes finitos (celdas de tamaños muy pequeños). Los parámetros que se deben cuidar al momento de generar una malla son: las formas de los elementos de la malla y el número total de elementos.

Cuando la geometría del modelo es regular, elegir la malla es sencillo. La malla se genera generalmente en el sentido de las coordenadas de direcciones. En caso de

trabajar con geometrías complejas, no se puede elegir una malla de esta forma porque, existen restricciones que imponen el método de generación de la malla. Por ejemplo, si un algoritmo está diseñado por una malla ortogonal, no se puede usar una malla non-ortogonal. Si las celdas tienen que ser cuadrilaterales, no se pueden usar celdas triangulares. En definitiva, cuando la geometría es compleja se tiene que hacer compromisos.

Es recomendable usar malla regular para geometrías irregulares. Por ejemplo, se pueden combinar malla rectangular, cilíndrica, esférica o non-ortogonal cerca de cuerpo con malla cartesiana en todo el resto del dominio.

Somos partido de la geometría entera de nuestro modelo y las mallas estructuradas que hemos generado no podrían permitirnos obtener resultados aceptables. Entonces, hemos dividido nuestro modelo longitudinalmente para obtener una parte del canal puesto que el modelo es simétrico: Modelo que ha sido presentado en la geometría.

Antes de generar la malla presentada, se han generado unas mallas regulares uniformes pero no nos han permitido hacer los cálculos porque, el número de celdas estaba por encima del límite que proporciona la versión educacional de Ansys, había entonces que buscar una malla que permite hacer los cálculos y en el mismo tiempo permite obtener resultados de alto rango en la zona de interés.

Hay que saber que no es sencillo alcanzar un resultado de alto rango, porque debido al tamaño reducido de la malla, el estudio y la experimentación pueden tardar horas.

Como nuestro modelo es tridimensional y presenta algunas irregularidades tal que el vertedero, su zona de transición entre el canal donde fluye el agua y la salida donde cae el agua, entonces para realizar una malla eficiente en cuanto a la zona de lectura de los resultados, el canal ha sido dividido en 3 partes:

- Una zona que va desde la entrada del canal (Inlet) aguas arriba hasta una cierta distancia antes del vertedero.
- Una zona que empieza antes del vertedero y se acaba después del vertedero
- Una zona aguas abajo del canal y después del vertedero que tiene como función esencial la salida de agua del sistema (Outlet).

Cada una de las 3 zonas debería tener su propia malla pero, la zona 2 tiene que tener una malla más elaborada y más fina, entonces hemos creado una inflación (Inflation) alrededor del vertedero en la Zona 2, cuya las características están contenidas en la tabla (II.2) siguiente:

Opción de Inflación	Transición suave
Ratio de Transición	0.272
Número Máximo de capas	5
Tasa de crecimiento	1.2
Algoritmo de inflación	Pre

Tabla II.2: Características numéricas de la inflación generada en la malla

Después hemos generado las mallas de las 3 zonas cuidando nos que el número de elemento total no sea por encima del límite del modelo. Así pues, las características de la malla por zona se pueden resumir así:

Zona 1: Malla estructurada: ortogonal, forma de los elementos: paralelepípedicos y tamaño del elemento: reducido, $e = 0.025m$

Zona 2: Malla estructurada: ortogonal, forma de los elementos: tetraédricos y tamaño del elemento: fino, $e = 0.007m$

Zona 3: Malla estructurada: ortogonal, forma de los elementos: paralelepípedicos y tamaño del elemento: medio, $e = 0.04m$

Zonas de transiciones entre las zonas (1y2) y las zonas (2y3): Malla no estructurada: híbrida, forma de los elementos: tetraedros y otro, tamaños de los elementos incognitos.

Se tiene que notar que la zona 3 no tiene mayor importancia en el estudio porque representa la salida, este tamaño de los elementos nos permite compensar el tamaño de la zona 2 que es la zona de mayor interés.

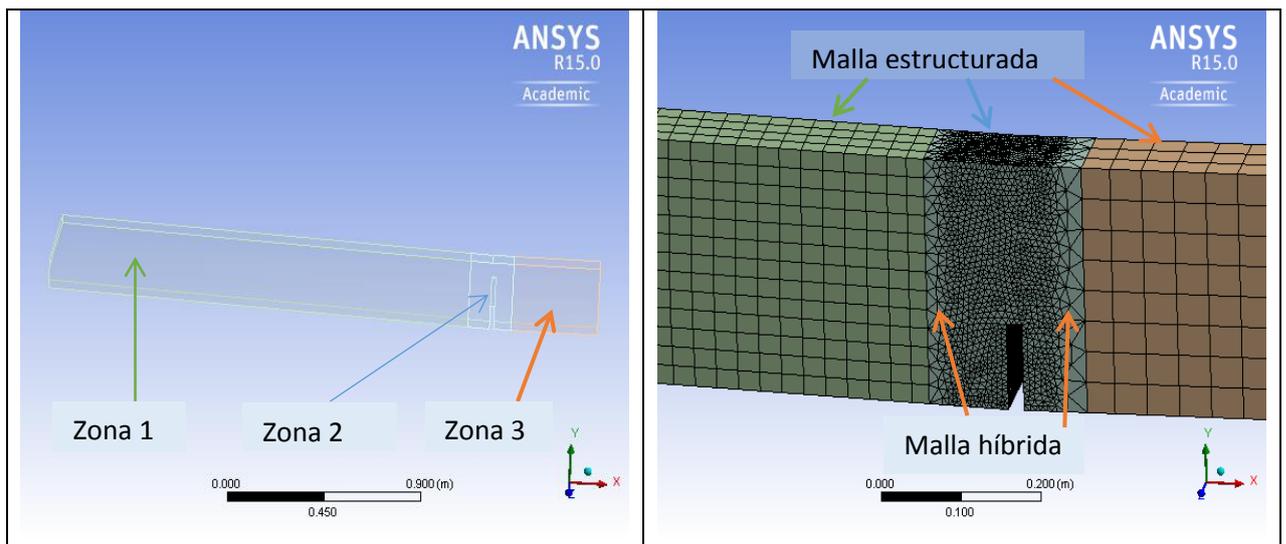


Figura II.11: Izquierda: Geometría de las 3 zonas del modelo numérico del canal y Derecha: Malla de cada zona del canal en ANSYS R15.0 Academic

La figura (II.11) nos presenta a la izquierda las 3 zonas definidas arriba y a la derecha dicha malla de cada una de las 3 zonas y también la zona de transición dónde se ha formado una malla híbrida.

Hay que notar que la malla ha sido generada para cada uno de los 3 tipos de vertederos y la tabla (II.3) siguiente nos presenta las características numéricas de las mallas generadas para cada tipo de vertedero.

Elementos característicos de las mallas	Triangular	Rectangular	Trapezoidal
Tamaño de los elementos Zona1 (m)	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02
Tamaño de los elementos Zona2 (m)	7.00E-03	7.00E-03	7.00E-03
Tamaño de los elementos Zona3 (m)	4.00E-02	4.00E-02	4.00E-02
Números de nudos	2.859E+04	2.862E+04	2.876E+04
Números de elementos	1.343E+05	1.344E+05	1.356E+05
Ángulo de curvatura normal	18.0°	18.0°	18.0°
Tamaño mínimo (m)	4.50E-04	4.50E-04	4.50E-04
Tamaño máximo de cara (m)	4.50E-02	4.50E-02	4.50E-02
Tamaño máximo (m)	7.53E-02	7.53E-02	7.53E-02
Tasa de crecimiento	1.85E+00	1.85E+00	1.85E+00
longitud mínima de paradas (m)	7.00E-03	2.00E-02	1.50E-02

Tabla II.3: Características numéricas de las mallas de los modelos numéricos del estudio en ANSYS R15.0 Academic.

II.2.3 – Definición de las Condiciones limites

Las figuras (II.12) y (II.13) que sigue nos presenta las principales condiciones límites de nuestro modelo que son: La entrada (Inlet), la salida (Outlet) y las zonas de simetría (Symmetry):

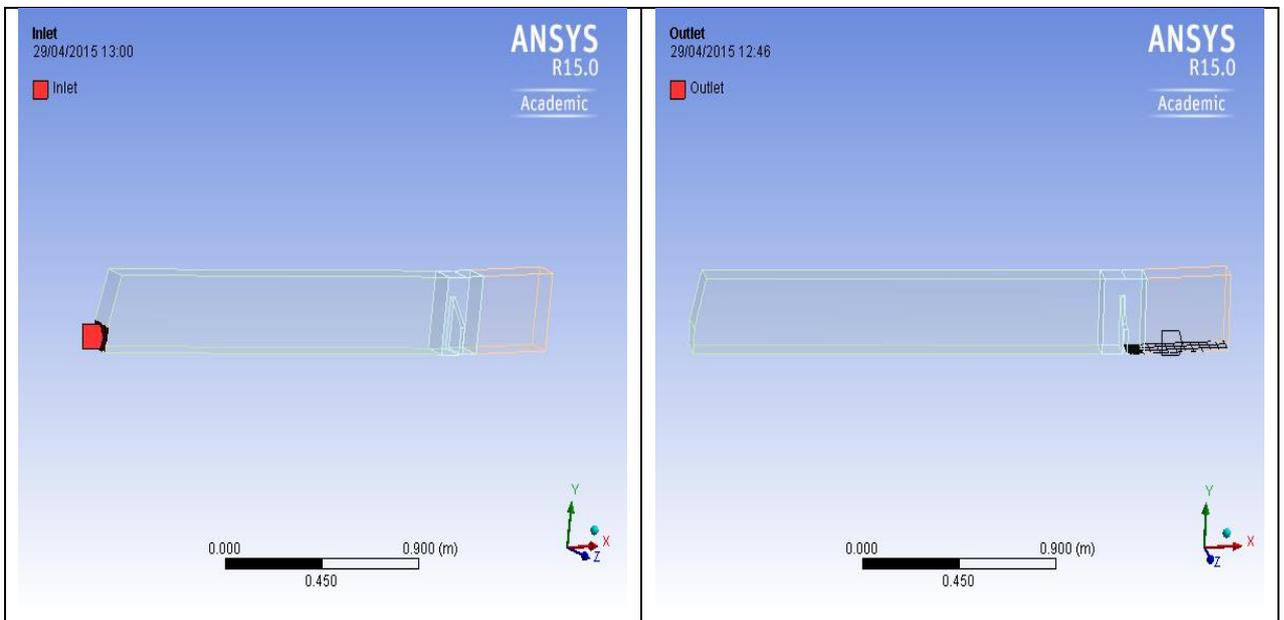


Figura II.12: Izquierda: Entrada (Inlet), Derecha: Salida (Outlet) del canal en ANSYS R15.0 Academic

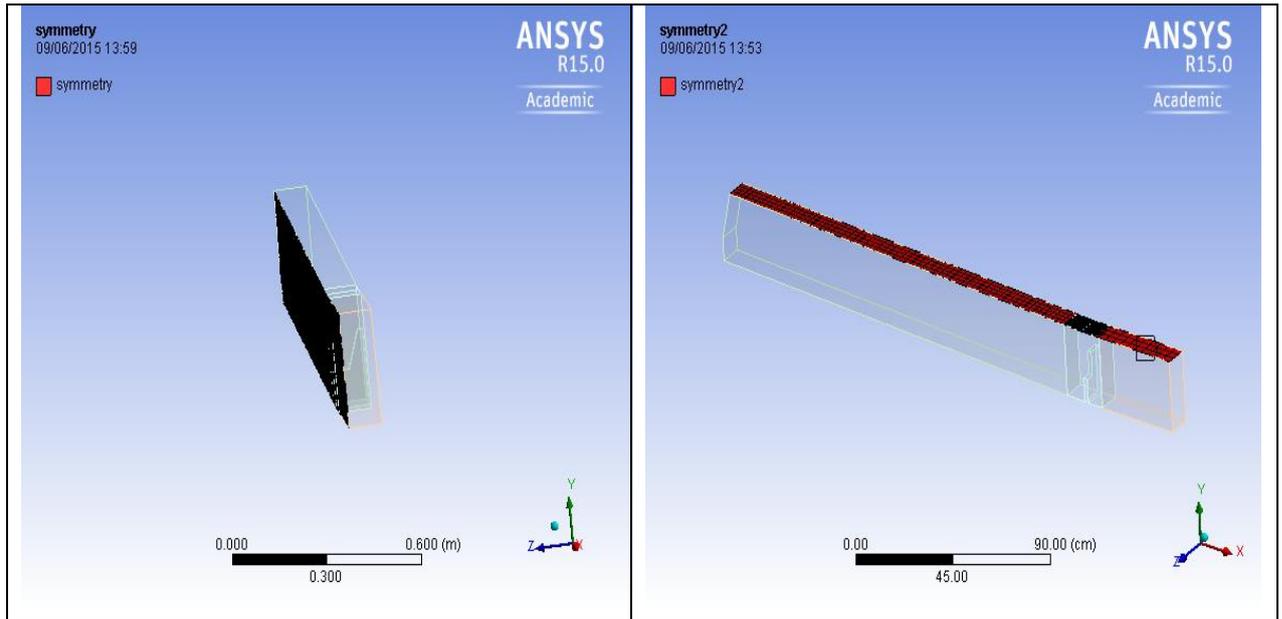


Figura II.13: Zonas de simetría (Symmetry) del canal en ANSYS R15.0 Academic. De izquierda a derecha: Plano longitudinal y plano paralelo a la base del canal.

- La entrada (Inlet) corresponde a Velocity Inlet es decir que en nuestro modelo el parámetro que vamos ir cambiando es la velocidad de entrada de agua dentro del canal aguas arriba. Así el caudal será aplicando el cálculo de la ecuación I.4.
- La salida (Outlet) corresponda a Pressure Outlet que es la presión de salida de agua del sistema.
- Las simetrías (Symmetry) correspondan a un plano longitudinal de simetría del canal y a un plano paralelo a la base del canal que permiten que todo que ha sido realizado por una parte del canal se tramite cuanto a resultados de simulaciones de manera fiel a la otra parte. La ventaja de usar (symmetry) es que nos permite realizar una malla muy bien afinada y ahorrar el tiempo de cálculo.
- Rugosidad de las paredes del canal, se seleccionaron las condiciones cerca de la pared disponible en ANSYS R15.0 Académico.

II.2.4 – Modelo computacional: Calibración del solver de cálculo y resolución del problema

Esta fase es la fase más complicada en un análisis mediante técnicas CFD. Hay que saber exactamente qué problema estamos resolviendo para poder elegir la ecuación que describe correctamente el movimiento del fluido que fluye. En nuestro caso, las ecuaciones de un flujo turbulento son las que vamos a elegir y el modelo de resolución tiene que ser muy eficiente en fin de garantizarnos resultados de calidad superior.

Así, las ecuaciones elegidas son las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS).

A) Ecuaciones Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) en 3D

Las ecuaciones Promediadas de Reynolds Navier-Stokes (Reynolds Average Navier Stokes equations, RANS) están aplicadas para resolver el problema que en este caso es el flujo del agua dentro de un canal rectangular y luego su descarga a través de un vertedero.

El sistema está compuesto de 2 ecuaciones: La ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento.

En el sistema de coordenadas cartesianas las 2 ecuaciones se escriben [26,27,28,29,30,31] :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.7})$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{II.8})$$

Dónde:

(i, j = 1, 2, 3)

u_i son las componentes promedio de la velocidad de Reynolds

t es el tiempo

g_i representa la aceleración de la gravedad

ρ es la densidad del fluido

P es la presión

μ es la viscosidad dinámica

τ_{ij} es el tensor turbulento de Reynolds

B) Modelación del Tensor Turbulento de Reynolds: Boussinesq Turbulencia-Viscosidad aproximación

Las hipótesis de Turbulencia-Viscosidad estuvieron introducidas por Boussinesq en 1877 y es análogo a la relación tensión-tasa de deformación de un fluido Newtoniano.

Según estas hipótesis, tenemos [32,33,34]:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (\text{II.9})$$

Dónde:

u'_i y u'_j son las componentes de las fluctuaciones de la velocidad

δ_{ij} es el delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ y $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$)

k es la energía cinética turbulenta ($k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2}$)

μ_t es la viscosidad turbulenta

Cuando introduzcamos la ecuación (II.9) que proviene de las hipótesis de Boussinesq en la ecuación (II.8) el número de incógnitas del sistema de ecuaciones RANS se reduce de 10 a 5.

En seguida tenemos que modelar la viscosidad turbulenta μ_t que es una propiedad del flujo. Existen varios métodos en ANSYS para alcanzar este objetivo pero en nuestro caso vamos a escoger el Modelo RKE para modelar la viscosidad turbulenta.

C) Modelo (RKE)

El Modelo RKE ha sido recientemente desarrollado y es diferente del modelo standard $k - \varepsilon$ en dos cosas importantes [26]:

- El Modelo RKE contiene una nueva formulación por la viscosidad turbulenta
- Una nueva ecuación de transporte por la tasa de disipación, ε , ha sido derivado de una ecuación exacta del cuadrado de la fluctuación de vorticidad.

El término “realizable” significa que el modelo integra mejor formulación matemática en cuanto a la tensión de Reynolds y es consistente con la física de los flujos turbulentos. El standard $k - \varepsilon$ modelo tampoco el RNG $k - \varepsilon$ modelo no tienen esas características.

El beneficio inmediato del Modelo RKE es que predice con mayor precisión la tasa de difusión de ambos planos y chorros de flujo. También proporcione un rendimiento superior para los flujos relacionados con la rotación, capas límite bajo fuertes gradientes de presión adversos, separación, y recirculación.

Los estudios iniciales han mostrado que el Modelo RKE da las mejores prestaciones de todas las versiones del modelo $k - \varepsilon$ para muchas validaciones de flujos separados y flujos con compleja conexión de flujo secundario [28].

El modelo expresa la viscosidad turbulenta en términos de k y de ε como [28,32,34]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.10})$$

Además, C_μ no es constante como en el caso standard.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (\text{II.11})$$

Las ecuaciones de transporte modeladas para k y ε en el Modelo RKE son [10,26,28]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{II.12})$$

Y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (\text{II.13})$$

Con

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (\text{II.14})$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (\text{II.15})$$

Dónde:

G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad.

G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad

Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa global de disipación: El número turbulento de Mach.

σ_k y σ_ε son números de Prandtl turbulentos

S_k y S_ε son términos fuentes que define el usuario.

C_2 , $C_{3\varepsilon}$ y $C_{1\varepsilon}$ son constantes

Las constantes C_2 , σ_k , y σ_ε del modelo se han establecido para asegurar que el modelo funciona bien para ciertos flujos canónicos. Las constantes de modelo son:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

Como el Modelo RKE nos permite resolver las ecuaciones del flujo, escogemos el modelo Volumen de Fluido (VOF) para evaluar la superficie libre de agua. Este modelo está descrito en el apartado siguiente.

D) Modelo Volumen de Fluido (VOF) para la modelación de la superficie libre

El modelo propuesto en este estudio resuelve las ecuaciones RANS para flujo turbulento inestable basado en el modelo de 2 ecuaciones $k-\varepsilon$. La técnica de control de volumen se utiliza para convertir las ecuaciones que rigen a las ecuaciones algebraicas que pueden resolverse numéricamente. Emplea el enfoque de la malla colocada [35].

La formulación Volumen de Fluido (VOF) se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no son mezclables. En este modelo además de las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento, uno resuelve una ecuación para la fracción de llenado de cada volumen de control [32]. Para cada fase adicional que se agrega a su modelo, una variable es introducida: c , la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones en volumen de todas las fases suman la unidad.

Los campos para todas las variables y las propiedades son compartidos por las fases y representan valores de volumen promediado, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases sea conocida en cada ubicación. Por lo tanto las variables y propiedades en cualquier celda dada son o puramente representativo de una de las fases, o el representante de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de fracción de volumen. En consecuencia, $c = 1$ para volúmenes de control (VC) que son ocupados por el agua y $c = 0$ por los volúmenes de control (VC) ocupados por aire [28]. La ecuación (II.18) denota el cambio de c [27,28,32,36].

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u_j c)}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$0 \leq c \leq 1 \quad (\text{II.17})$$

Dónde

u_j ($j=1, 2, 3$) representan las componentes promediadas de la velocidad del flujo

x_j ($j=1, 2, 3$) representan las componentes de las coordenadas cartesianas

t representa el tiempo

c es la fracción de volumen

$c(x, t) = c_c$ corresponde a la interface entre fluido 1 y fluido 2

$c(x, t) > c_c$ corresponde a la región ocupada por el fluido 1

$c(x, t) < c_c$ corresponde a la región ocupada por el fluido 2

Dónde c_c es un valor crítico arbitrario [36].

c_c va aumentando mientras crece la región ocupada por uno de los dos fluidos, en nuestro caso, como aumentará el caudal de agua, el c_c ira aumentando en el sentido del agua y disminuyendo en el sentido del aire.

La posición inicial de la interface determina la elección del valor de c .

El cálculo del movimiento de los flujos de líquido y gas se realizan por separado. La superficie libre es tratada como un límite en el que se aplican las condiciones de contorno cinemáticos y dinámicos. Las celdas que se convierten en irregular debido a ser cortado por la superficie libre requieren un tratamiento especial (valores de las variables se extrapolan a lugares nodales se extiende en el otro lado de la interfaz). El método se utilizó para calcular los flujos de alrededor de barcos y cuerpos sumergidos [28].

Alternativamente, se puede tratar agua y aire como un único fluido cuyas propiedades varían en el espacio de acuerdo con la fracción en volumen de cada fase, es decir [27,28,32]:

$$\rho = \rho_1 c + \rho_2 (1 - c) \quad (\text{II.18})$$

$$\mu = \mu_1 c + \mu_2 (1 - c) \quad (\text{II.19})$$

Dónde:

ρ es la densidad

μ es la viscosidad dinámica

Los índices 1 y 2 representan los dos fluidos.

En general, por un sistema de n -fases, la densidad y la viscosidad del volumen fracción promediado toman las formas siguientes [29,30]:

$$\rho = \sum_{q=1}^n c_q \rho_q \quad (\text{II.20})$$

$$\mu = \sum_{q=1}^n c_q \mu_q \quad (\text{II.21})$$

Dónde:

q representa la q -ta fase

n representa el número total de fases.

E) Resolución

Nuestro trabajo se ha realizado utilizando el Cluster del laboratorio de Mecánica de Fluidos. El Cluster es una red de ordenadores de gran capacidad permitiendo realizar altos cálculos. Cada tipo de vertedero se ha calculado en 1 ordenador del Cluster.

Los cálculos se hicieron según un proceso iterativo hasta la convergencia de la solución. Una función flujo ha sido creada para controlar la convergencia de nuestro algoritmo de cálculo. Los cálculos para caudales pequeños y grandes tardaron horas.

La figura (II.13), la figura (II.14) y la figura (II.15) nos enseña el comportamiento de la función flujo de los cálculos y las curvas de convergencias de algunos casos:

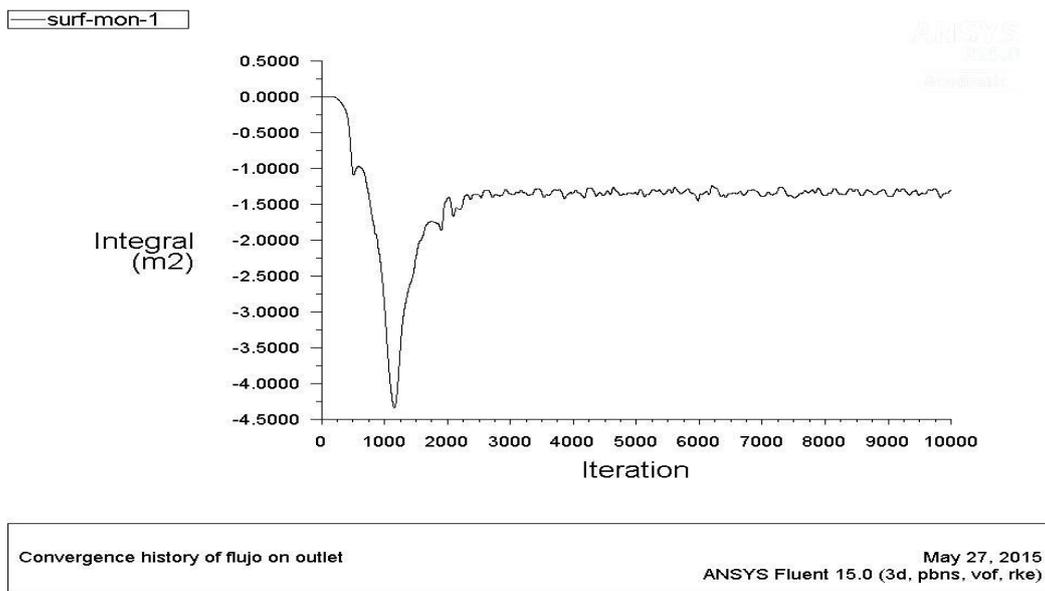


Figura II.14: Curva de convergencia a la salida, vertedero triangular.

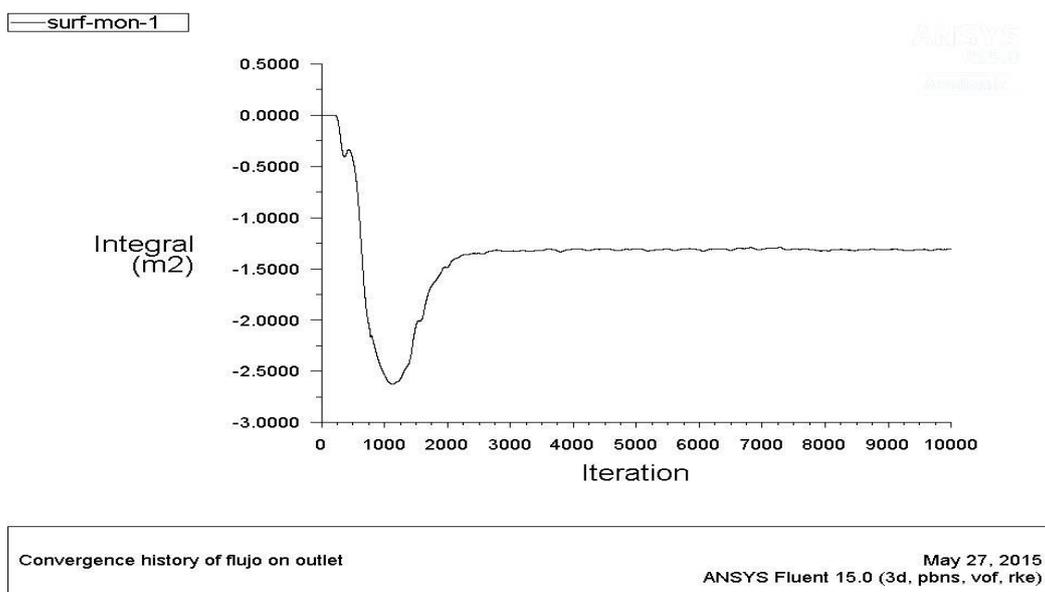


Figura II.15: Curva de convergencia a la salida, vertedero rectangular.

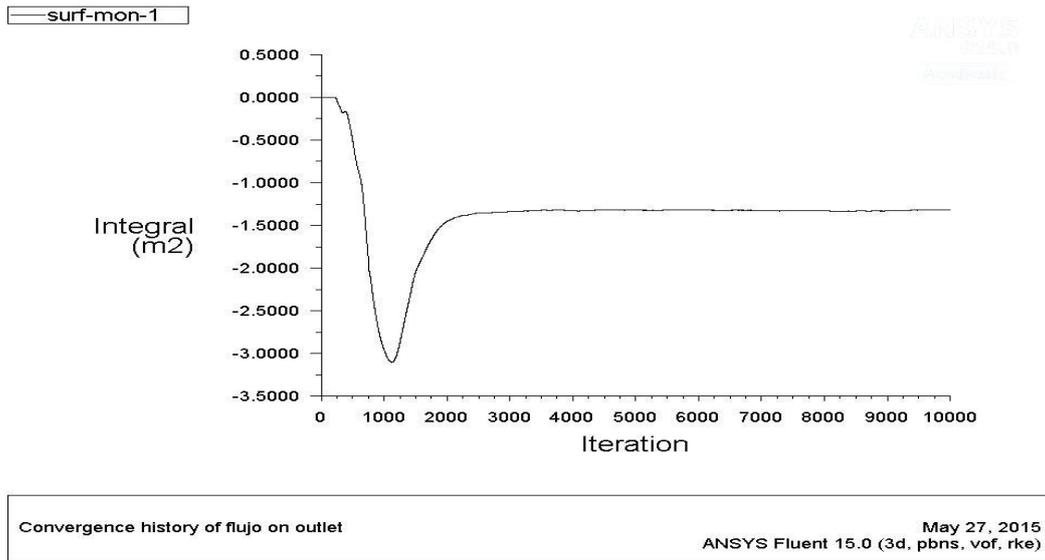


Figura II.16: Curva de convergencia a la salida, vertedero trapezoidal.

Como se puede ver en estas curvas de la figura (II.14), de la figura (II.15) y de la figura (II.16) a partir de 3000 iteraciones el algoritmo de cálculo ya ha convergido.

El umbral de los residuos está calibrado de la manera siguiente: 10^{-6} por la ecuación de continuidad y 10^{-3} por las otras variables.

F) Visualización del Modelo después la resolución en ANSYS R15.0 Academic

ANSYS R15.0 Academic nos permite ver directamente el comportamiento del interior de canal según el parámetro que nos interesa. En nuestro caso vamos a visualizar la altura de agua y la evolución de la fracción volumétrica en el interior del canal.

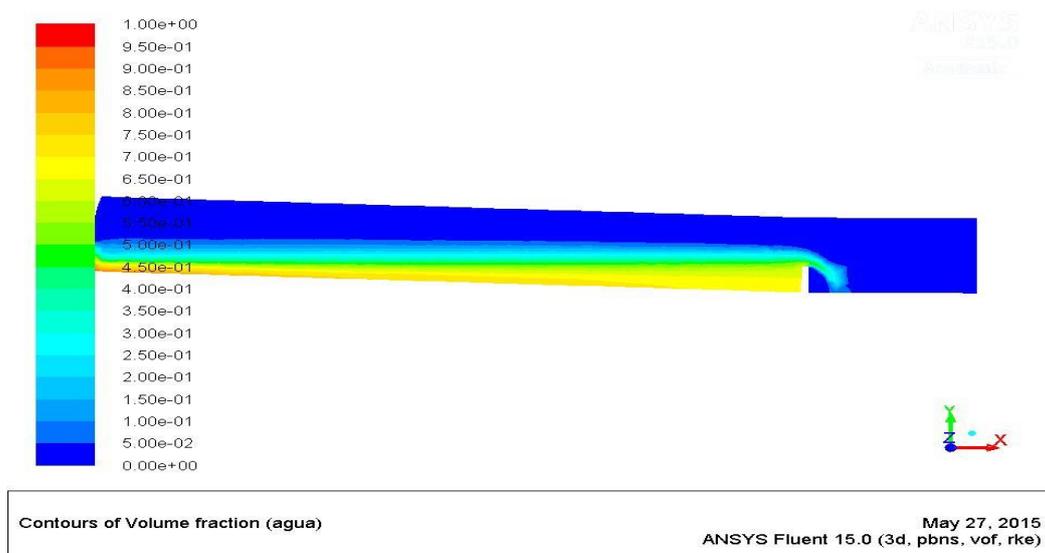


Figura II.17: Perfil de la lámina de agua por el vertedero triangular en ANSYS R15.0 Academic

La figura (II.17) nos presenta el perfil de la lámina de agua del canal por un vertedero triangular, caudal de entrada $Q=1l/s$.

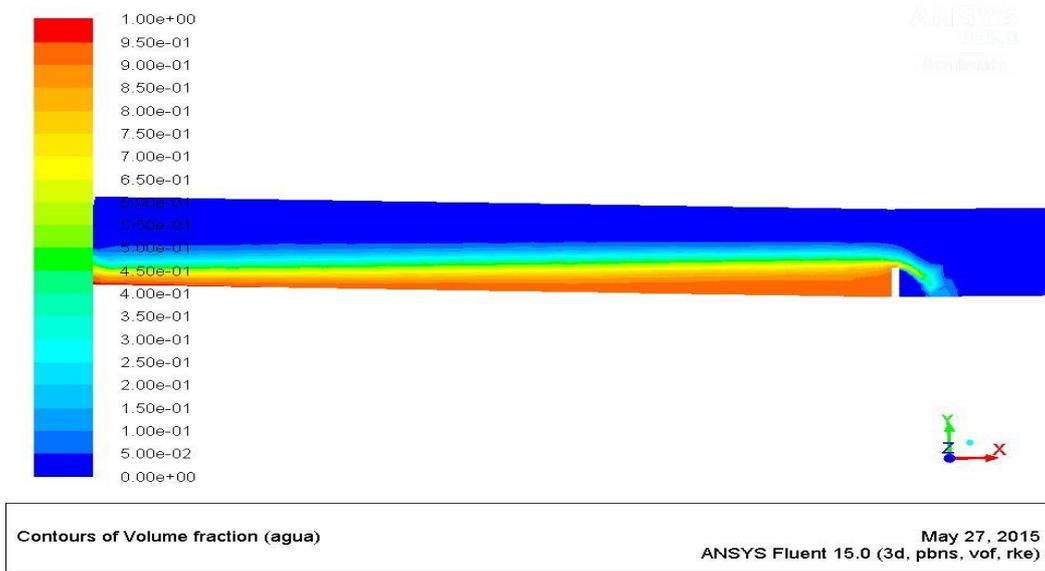


Figura II.18: Perfil de la lámina de agua por el vertedero rectangular en ANSYS R15.0 Academic

La figura (II.18) nos presenta el perfil de la lámina de agua del canal por un vertedero rectangular, caudal de entrada $Q=1.67l/s$.

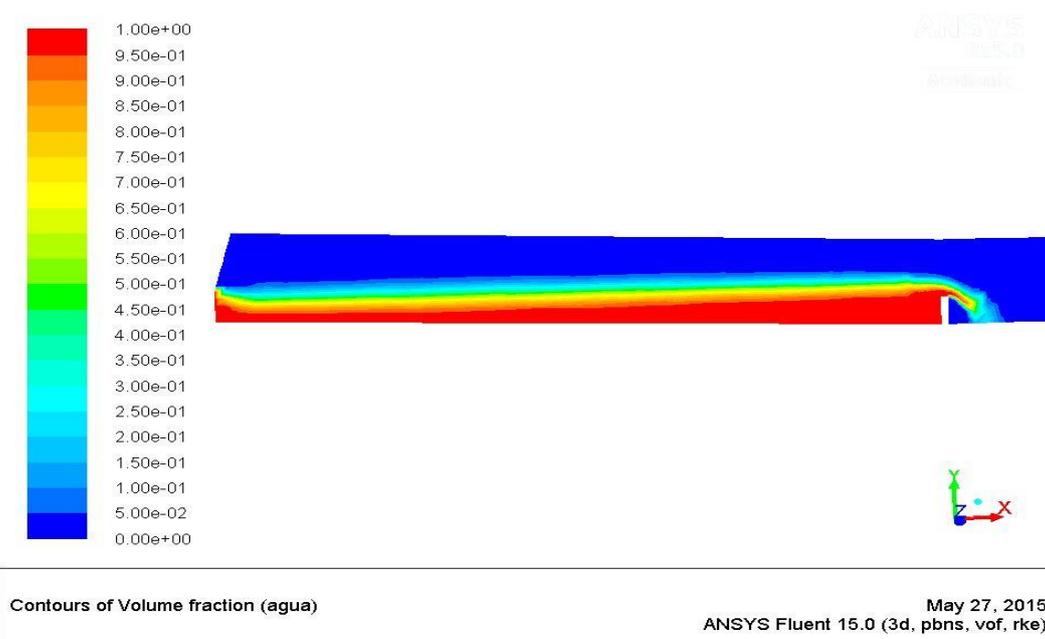


Figura II.19: Perfil de la lámina de agua por el vertedero trapezoidal en ANSYS R15.0 Academic

La figura (II.19) nos presenta el perfil de la lámina de agua del canal por un vertedero trapezoidal, caudal de entrada $Q=3.03$ l/s.

Las figuras (II.17), (II.18) y (II.19) nos ayudan a comprender que el volumen Fracción va aumentando cuando aumenta el caudal al interior del canal y que habrá que encontrar el volumen fracción que corresponda a cada caudal o altura de agua.

II.2.5 – Post Tratamiento: Procesamiento de datos numéricos

Una vez las simulaciones realizadas, los datos numéricos recuperados han sido procesadas en la Hoja de Cálculo Excel.

Una hoja de resultado en formato ASCII ha sido recuperado de ANSYS, los datos contenidos en esta hoja son los siguientes: Datos de las coordenadas de posiciones x, y, z ocupadas por el fluido durante toda la simulación y los datos de fracción volumétrica de agua c .

Una vez abierta en EXCEL los datos han sido procesados: Los datos han sido redondeados de la manera siguiente, 3 cifras significativas para las coordenadas de posición y 2 cifras significativas para los datos de fracción volumétrica.

Un filtro numérico ha sido creado para permitarnos obtener los datos de las alturas de aguas (coordenadas y en el modelo) en función de la fracción volumétrica c encima del punto $x=0$ y $z=0$.

Esto ha sido realizado por varios caudales y por los 3 vertederos: triangular rectangular y trapezoidal.

Como sabemos que c_c es un valor crítico arbitrario [28], hemos buscado los valores correspondientes de c_c por los valores de alturas de agua dentro del canal, basándonos en resultados teóricos y experimentales para diferentes caudales.

Hemos entonces realizado de nuevo el proceso, pero esta vez al momento de filtrar los datos, se entraron los datos de las alturas de aguas y se buscaron los valores de fracción volumétrica correspondiente.

Hay que notar que los resultados teóricos nos permiten tener una idea sobre el intervalo dónde se logra la altura de agua al interior del canal por un caudal dado.

Unas curvas de comparación entre los resultados teóricos y los resultados de simulaciones computacionales y ensayos de laboratorio han sido representadas. Para que esa comparación se quede más cuantitativa, una curva de ajuste se ha creado para cada tipo de vertedero a partir de las curvas de los ensayos experimentales y de la minimización del error cuadrático que existe entre las curvas de los ensayos experimentales y las curvas de ajuste que son de la forma: $Q = KH^n$

Siendo que n puede tener la forma:

$$\text{Vertedero triangular: } n = \frac{5}{2}$$

$$\text{Vertedero rectangular: } n = \frac{3}{2}$$

$$\text{Vertedero trapezoidal: } n = \frac{3}{2}$$

En el caso del vertedero trapezoidal, le aproximamos a un vertedero rectangular de Longitud, la base del trapecio.

Conclusión

En este capítulo hemos presentado la metodología empleada para llevar a cabo este trabajo.

Las razones por las cuales hemos elegido nuestras geometrías han sido aclaradas.

El equipo de ensayo de laboratorio también ha sido presentado así como la metodología experimental y las características de los elementos.

La calibración del modelo SWMM 5 ha sido expuesto por una probable aplicación.

La metodología de análisis de los vertederos mediante técnicas CFD ha sido presentada y los elementos de resolución del problema detallados tan como las dificultades que se pueden encontrar haciendo un tal estudio.

En el Capítulo siguiente los resultados de la caracterización de los vertederos estudiados van a ser presentados y analizado.

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS VERTEDEROS HIDRÁULICOS MEDIANTE TÉCNICAS CFD

Introducción

En este capítulo presentamos y analizamos los resultados obtenidos en ANSYS R15.0 Academic y en laboratorio cuanto al nivel de agua del canal en función del caudal de entrada y de la geometría del vertedero, luego haremos una comparación con la literatura y por acabar validaremos el comportamiento de los diferentes vertederos en SWMM 5.

III.1 – Presentación y análisis de los resultados del estudio

III.1.1 – Presentación y análisis de los resultados de las técnicas CFD

Las figuras siguientes nos presentan las curvas de alturas de agua en función de la fracción volumétrica de agua:

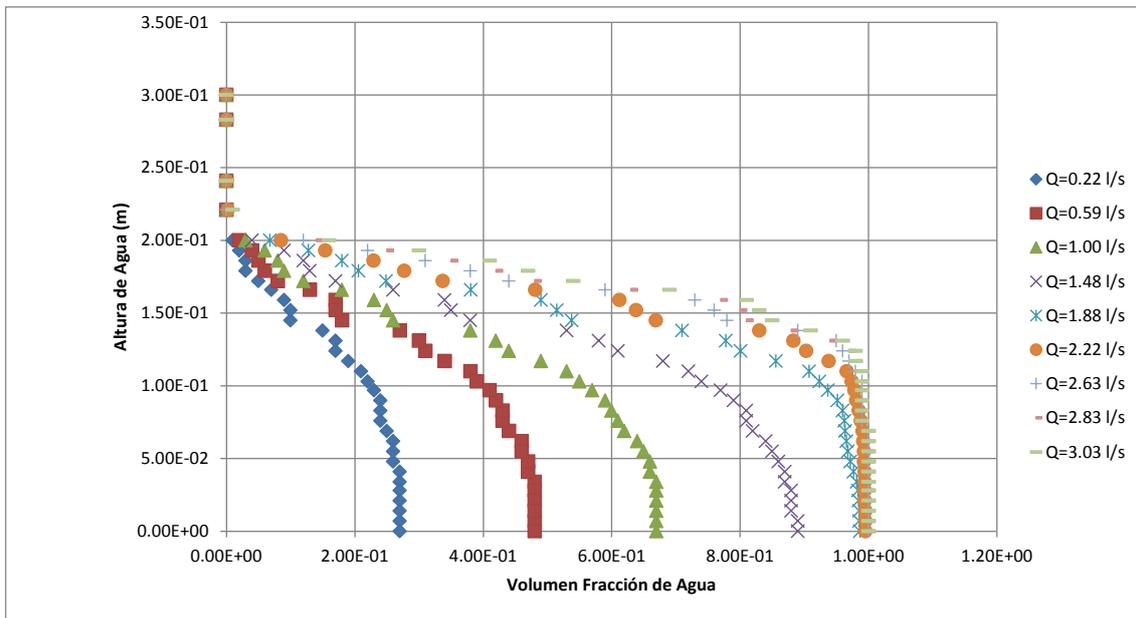


Figura III.1: Evolución de las Alturas de Agua en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero triangular.

La figura (III.1) nos presenta la evolución a lo largo de las simulaciones de las alturas de agua encima del punto $x=0$ y $z=0$ en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero triangular.

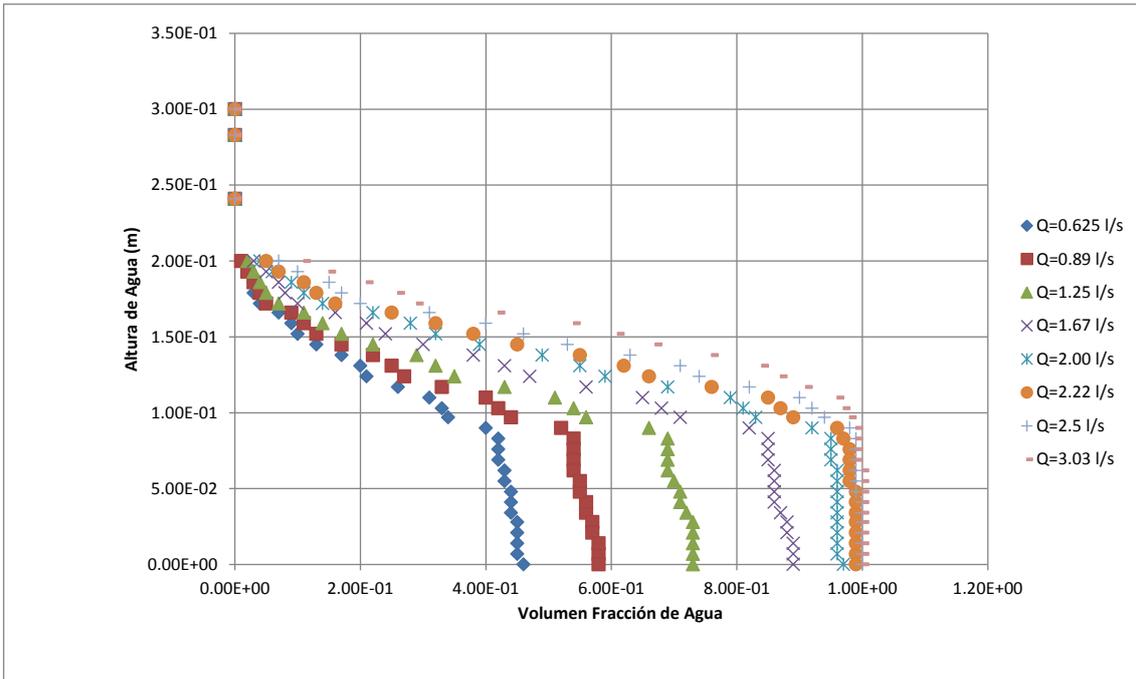


Figura III.2: Evolución de las alturas de agua en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero rectangular.

La figura (III.2) nos presenta la evolución a lo largo de las simulaciones de las alturas de agua encima del punto $x=0$ y $z=0$ en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero rectangular.

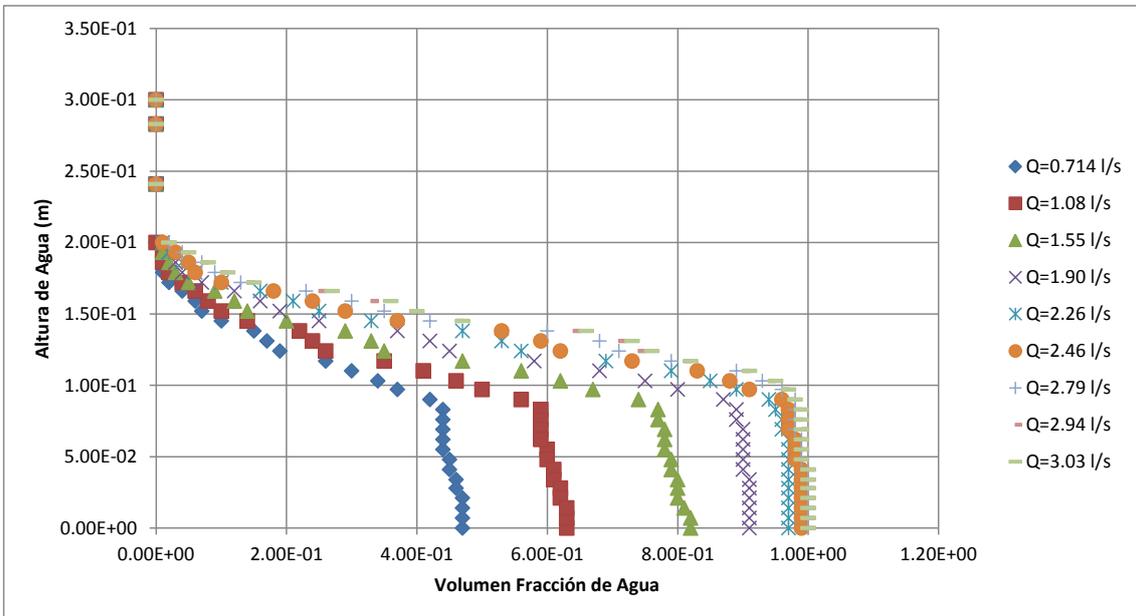


Figura III.3: Evolución de las alturas de agua en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero trapezoidal.

La figura (III.3) nos presenta la evolución a lo largo de las simulaciones de las alturas de agua encima del punto $x=0$ y $z=0$ en función de la fracción volumétrica de agua por el vertedero trapezoidal.

De la figura (III.1), la figura (III.2) y de la figura (III.3) podemos decir que:

- Por un cierto caudal pequeño u grande, la fracción volumétrica de agua va disminuyendo cuando aumenta la altura de agua.
- Cuando el Caudal va aumentando, la fracción volumétrica de agua va aumentando también por una cierta Altura de agua.
- Cuando aumenta el Caudal, la fracción volumétrica de agua aumenta también hasta llegar su máximo que es el valor $c = 1$.

Puesto que en la simulación tenemos 2 fases, el agua ocupa el espacio del aire cuando aumenta el caudal sin embargo no se puede decir exactamente donde se logra la interface de los 2 fluidos.

Las curvas que presentemos en seguida son aquellas que representan la evolución de la fracción volumétrica de agua en función de cada altura de agua obtenida por un caudal bien definido:

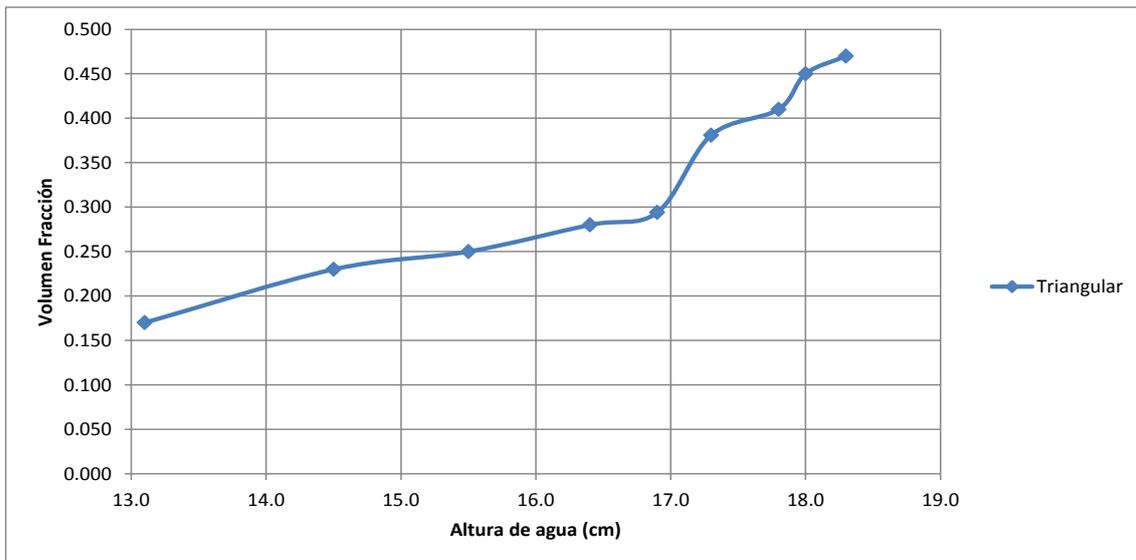


Figura III.4: Evolución de la fracción volumétrica en función cada Altura de agua por un caudal bien definido caso del vertedero triangular.

En la figura (III.4) de manera general la fracción volumétrica va aumentando en función de las alturas de aguas correspondiente. Como ejemplos precisos:

Por el Caudal $Q = 0.22(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H = 13.1cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c = 0.17$

Por el Caudal $Q=1(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H=15.5cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c=0.25$

Por el Caudal $Q=3.03(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H=18.3cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c=0.47$

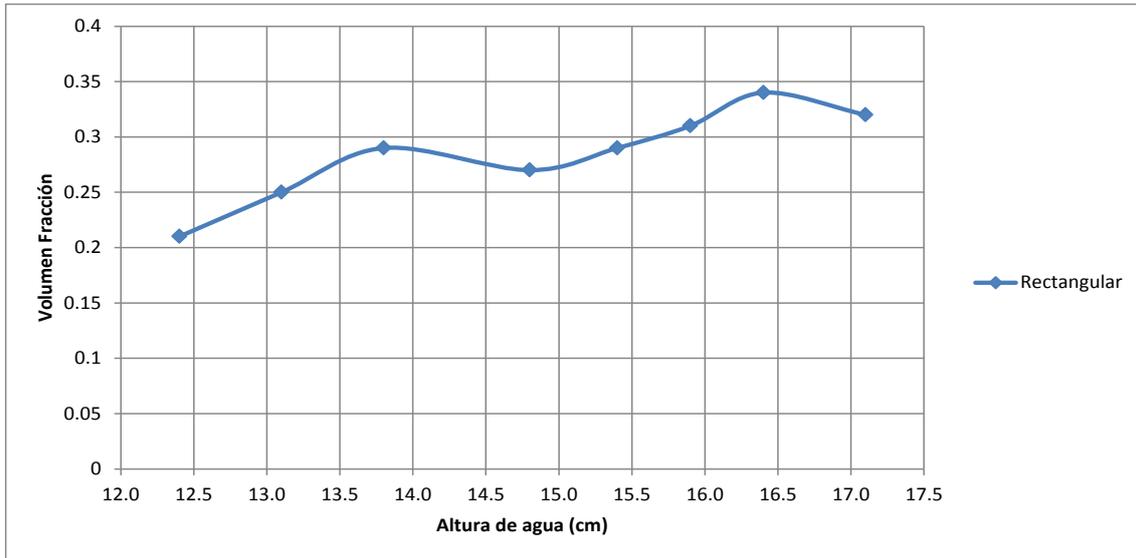


Figura III.5: Evolución del Volumen Fracción en función cada Altura de agua por un caudal bien definido caso del vertedero rectangular.

En la figura (III.5) se puede ver que el volumen Fracción adopta un comportamiento no lineal. Porque mientras que van aumentando los caudales y las alturas de agua, el Volumen Fracción de Agua crece y decrece. Como ejemplo ilustrativo:

Por el Caudal $Q=1.25(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H=13.8cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c=0.29$

Por el Caudal $Q=1.67(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H=14.8cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c=0.27$

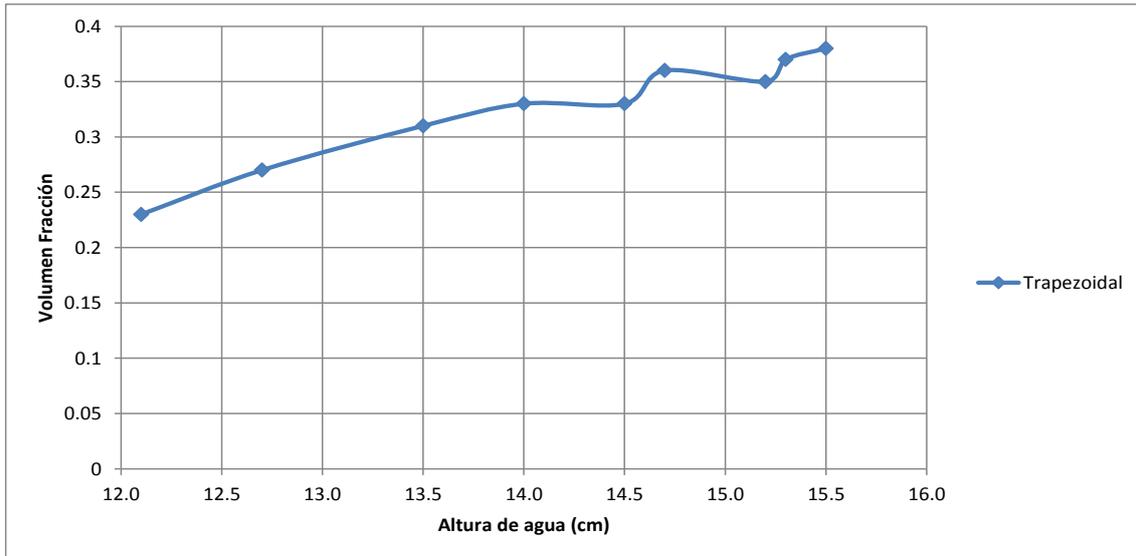


Figura III.6: Evolución del Volumen Fracción en función cada Altura de agua por un caudal bien definido caso del vertedero trapezoidal.

En la figura (III.6) de manera general el volumen Fracción va aumentado en función de las alturas de aguas correspondiente hasta una cierta altura y después empieza a fluctuar. Como ejemplo ilustrativo tenemos:

Por el Caudal $Q = 0.714(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H = 12.1cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c = 0.23$

Por el Caudal $Q = 2.46(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H = 14.7cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c = 0.36$

Por el Caudal $Q = 2.79(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H = 15.2cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c = 0.35$

Por el Caudal $Q = 3.03(l/s)$, para obtener la Altura de agua $H = 15.5cm$, la fracción volumétrica tiene que ser $c = 0.38$

De manera general, las figuras (III.4), (III.5) y (III.6) nos enseñan que la evolución de la fracción volumétrica no es lineal y concorde bien con la característica arbitraria de c_c que hemos presentado en el capítulo II.

El objetivo principal de nuestro trabajo ha sido encontrar las curvas $Q=f(h)$ por 3 tipos de vertederos mediante técnicas CFD y comparar las con aquellas obtenidas en laboratorio y en SWMM 5.

Esas curvas $Q=f(h)$ son las que presentamos en el apartado siguiente:

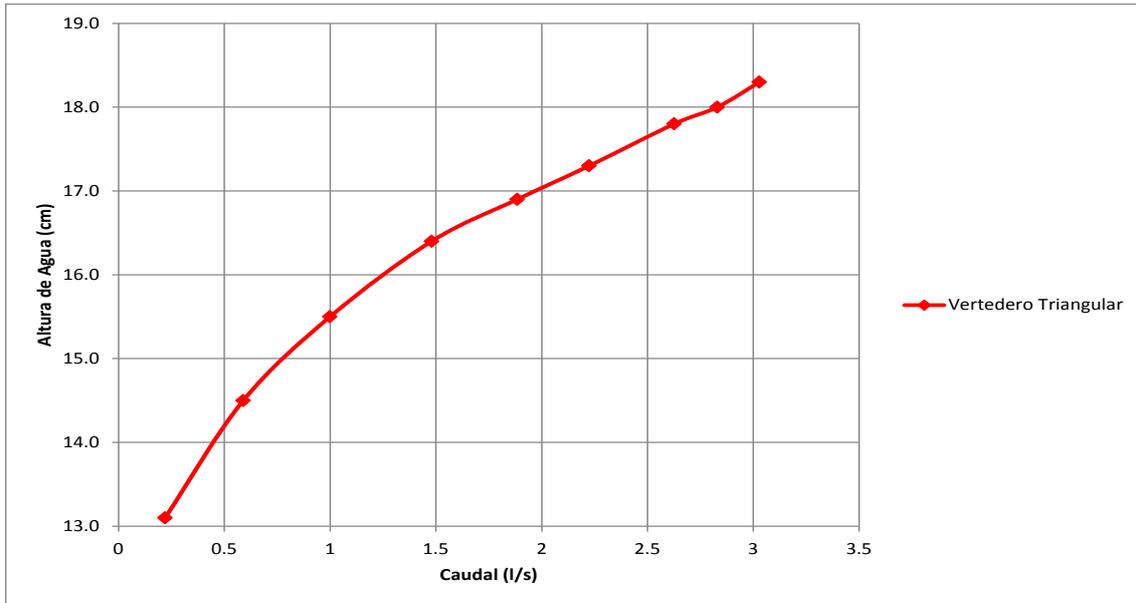


Figura III.7: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero triangular.

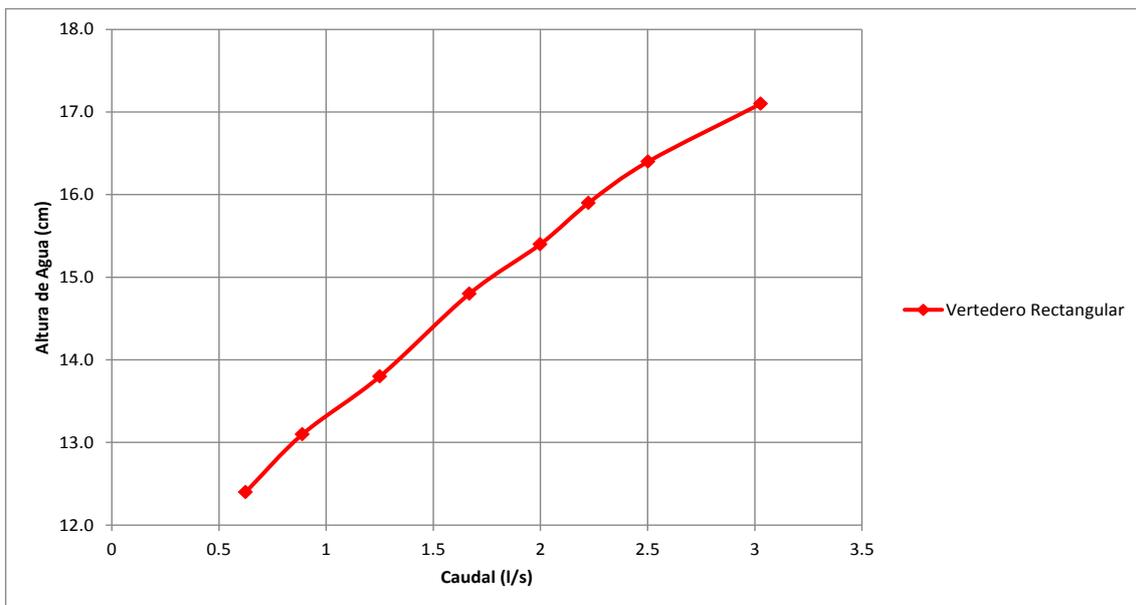


Figura III.8: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero rectangular.

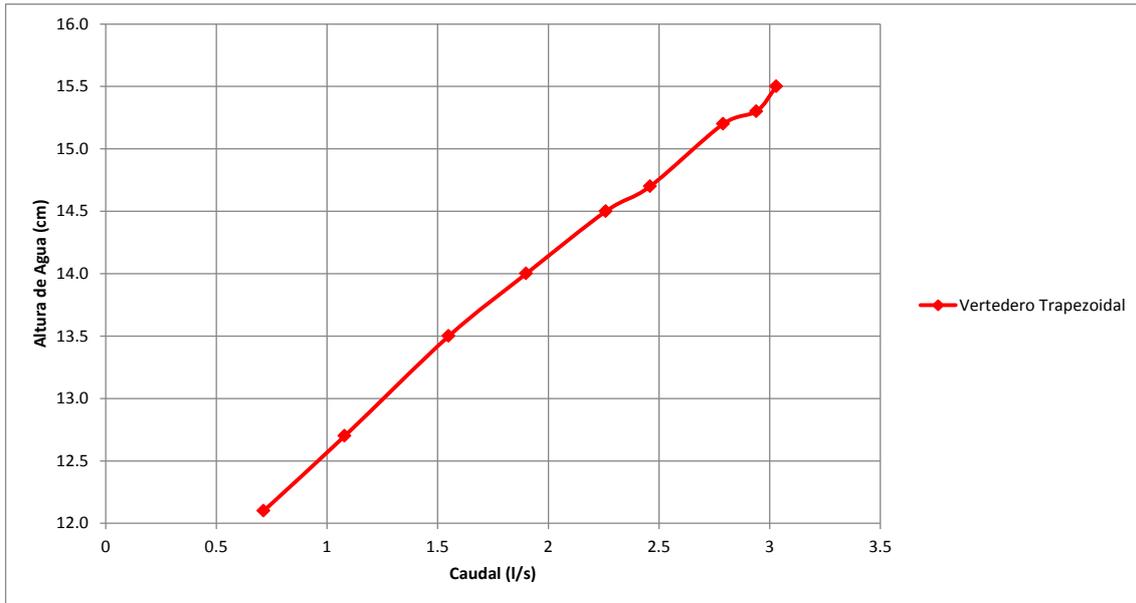


Figura III.9: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero trapezoidal.

La Figura (III.7), la Figura (III.8) y la Figura (III.9) representan las curvas de Alturas de Agua en función del caudal de entrada al canal respectivamente por los vertederos triangular, rectangular y trapezoidal obtenidas mediante técnicas CFD.

III.1.2 – Presentación de los resultados experimentales

Los ensayos realizados en laboratorio nos han permitido obtener estas curvas de Alturas de Agua en función del caudal de entrada del canal:

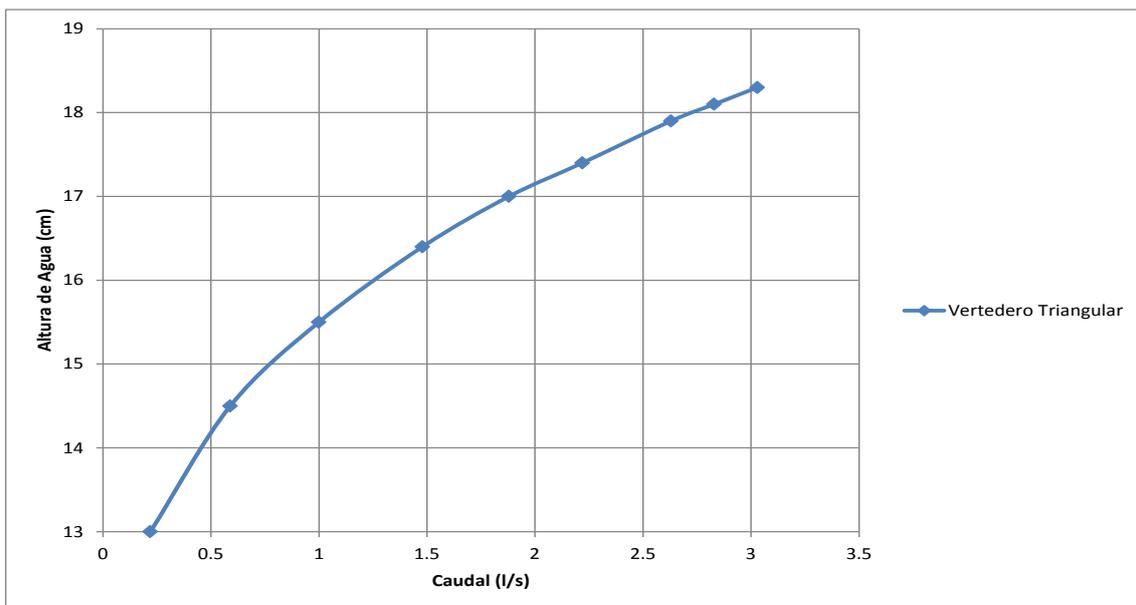


Figura III.10: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero triangular

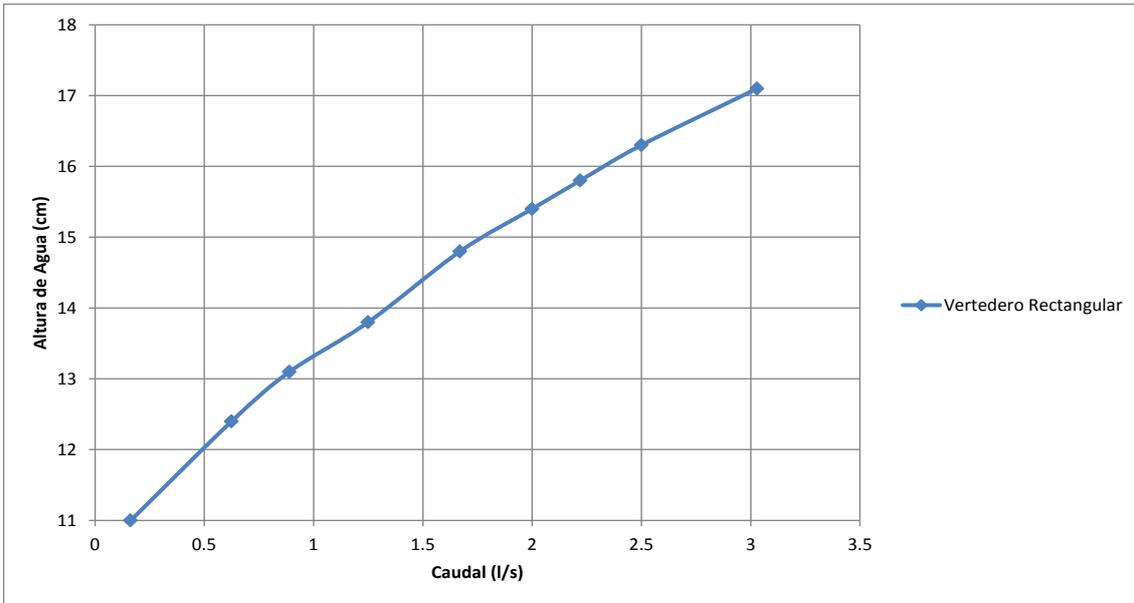


Figura III.11: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero rectangular

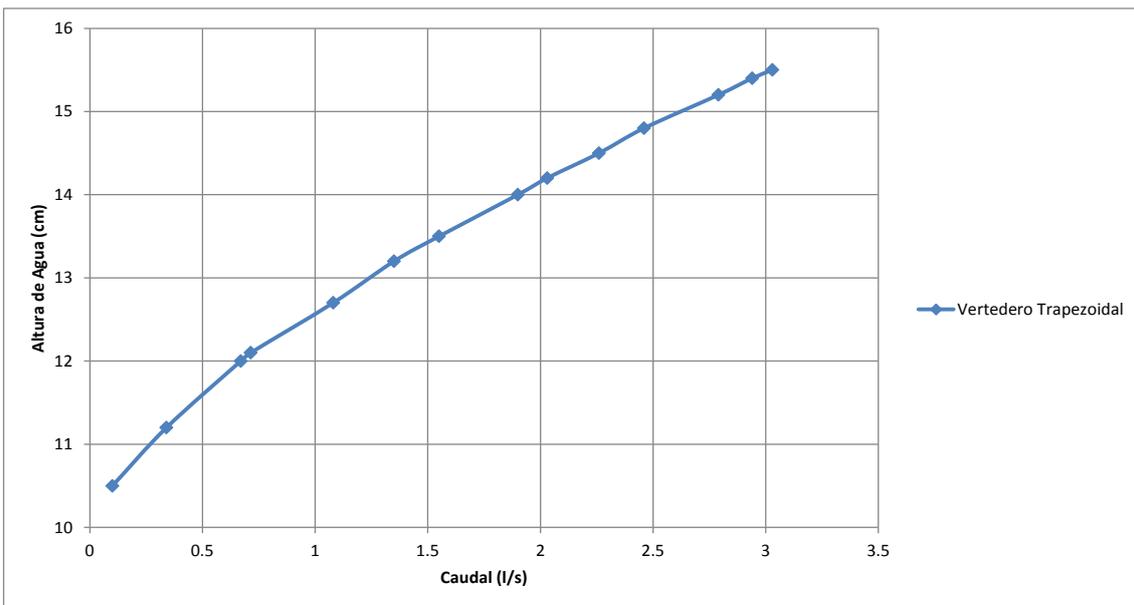


Figura III.12: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por el vertedero trapezoidal.

La figura (III.10), la figura (III.11) y la figura (III.12) representan las curvas de Alturas de Agua en función del caudal de entrada al canal respectivamente por los vertederos triangular, rectangular y trapezoidal obtenidas por los ensayos experimentales.

Como se puede ver en los 3 casos, el crecimiento del caudal produzca la aumentación de la altura de agua al interior del canal. Por el mismo caudal, la altura de agua del caso del vertedero triangular es la más elevada, seguida por la del vertedero rectangular y por terminar la del vertedero trapezoidal.

III.1.2 – Comparación de los resultados obtenidos con la literatura

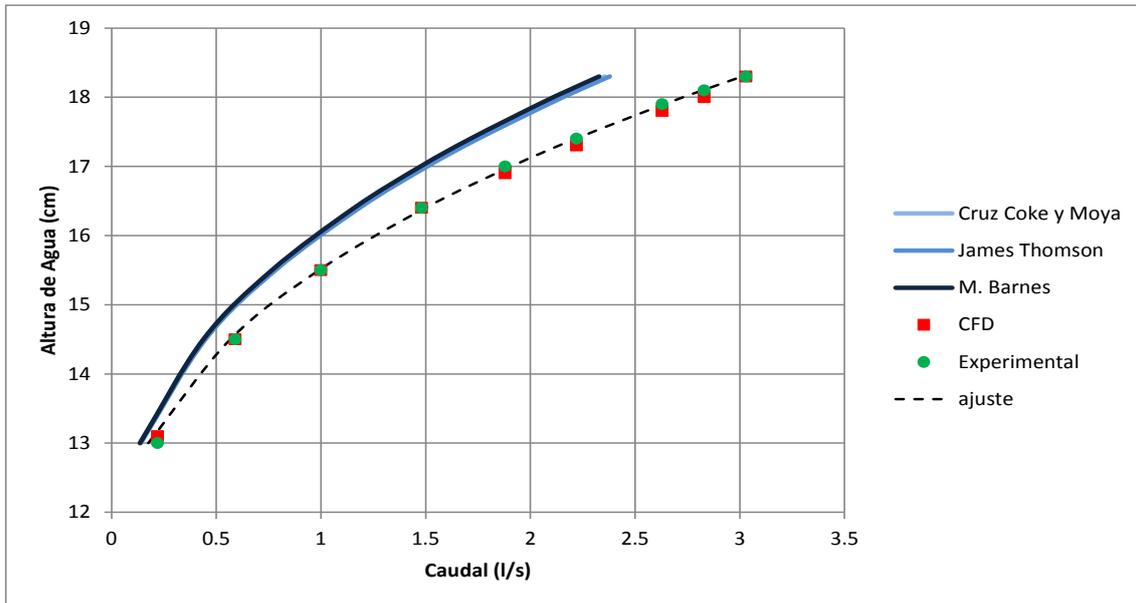


Figura III.13: Comparación de las curvas *Altura de Agua en función del Caudal de entrada con la literatura por el vertedero triangular.*

La figura (III.13) presenta por un vertedero triangular, la comparación entre las curvas características de Alturas de Agua en función del Caudal de entrada obtenidas mediante técnicas CFD y por ensayos de Laboratorio con las curvas presente en la literatura.

Analizando esta figura es claro que todas las curvas de la literatura se superponen por un lado y que la curva obtenida mediante técnicas CFD y la curva de ensayos de laboratorio se superponen por otro lado. Pero los dos grupos de curvas no se superponen, esto puede ser debido al hecho que nuestro dispositivo no responde a las restricciones que imponen las formulas teóricas.

Se ve claramente que los coeficientes de descargas son diferentes, porque para las mismas alturas de agua los caudales son diferentes. Un ejemplo ilustrativo muy simple es el siguiente:

Para la Altura de Agua $H=17\text{cm}$ tenemos por las técnicas CFD y los ensayos de laboratorio los caudales siguientes: $Q=1.88\text{ l/s}$, sin embargo tenemos para los resultados de la literatura (Cruz Coke y Moya $Q=1.49\text{ l/s}$ y James Thomson $Q=1.51\text{ l/s}$).

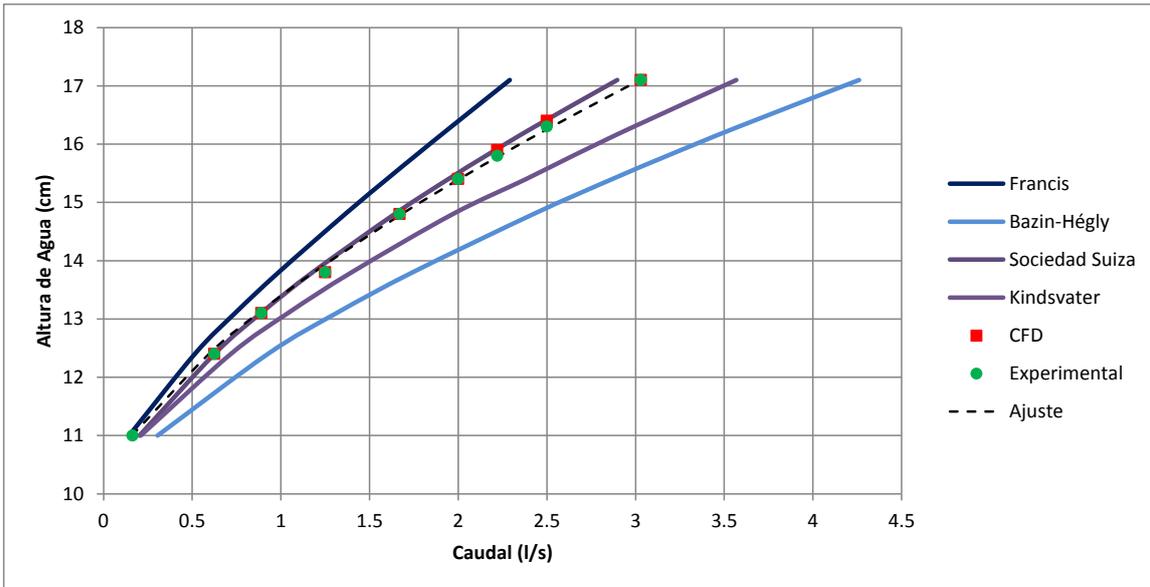


Figura III.14: Comparación de las curvas *Altura de Agua en función del Caudal de entrada* con la literatura por el vertedero rectangular.

La figura (III.14) presenta por un vertedero rectangular, la comparación entre las curvas características de Alturas de Agua en función del Caudal de entrada obtenidas mediante técnicas CFD y por ensayos de Laboratorio con las curvas presente en la literatura.

Esta figura nos enseña que la curva obtenida mediante técnica CFD, la curva de ensayos experimental y la curva obtenida por la fórmula de Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos se superponen perfectamente, es decir que el coeficiente de descarga que nos proporciona está fórmula es el más adaptado cuanto a la caracterización de vertederos rectangulares con contracciones laterales.

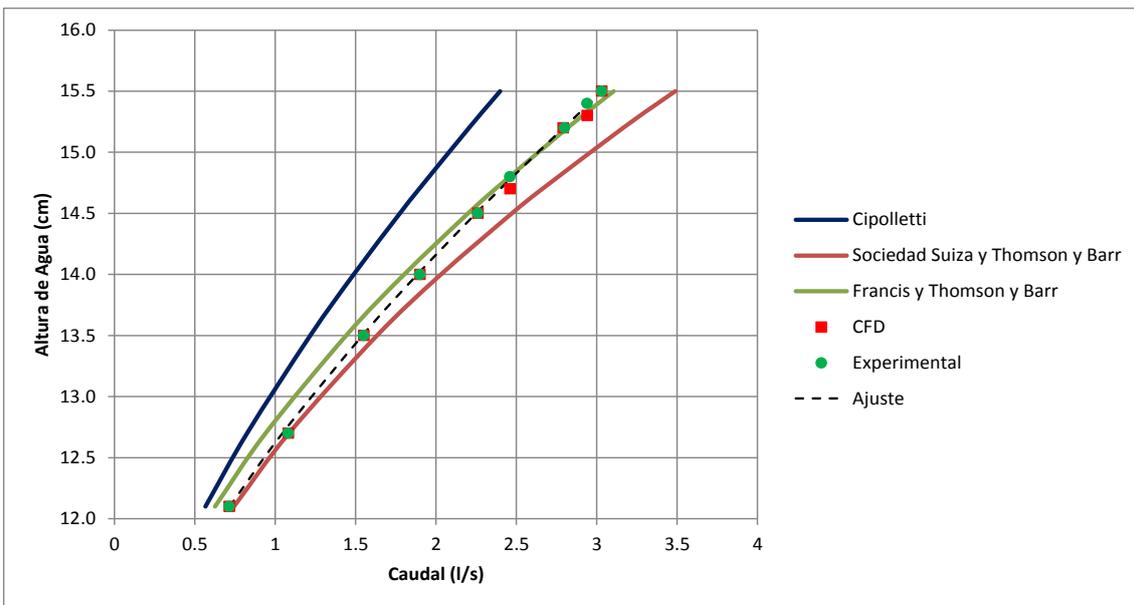


Figura III.15: Comparación de las curvas *Altura de Agua en función del Caudal de entrada* con la literatura por el vertedero trapezoidal.

La figura (III.15) presenta por un vertedero trapezoidal, la comparación entre las curvas características de Alturas de Agua en función del Caudal de entrada obtenidas mediante técnicas CFD y por ensayos de Laboratorio con las curvas presente en la literatura.

Las curvas de la figura (III.15) nos enseñan que cuando los caudales son pequeños las curvas características obtenidas mediante técnicas CFD y ensayos experimentales se superponen con la curva de la fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos juntada a la fórmula de Thomson y Barr, pero cuando estos caudales pasan a ser grandes esta curva se superponen con la curva de la fórmula de Francis juntada a la fórmula de Thomson y Barr.

De las figuras (III.13), (III.14) y (III.15) obtenemos la tabla (III.1) que nos presenta las ecuaciones respectivas de las curvas de ajuste a los resultados experimentales, el error cuadrático medio cometido para cada tipo de vertedero y los coeficientes de Descargas de los vertederos de nuestro estudio. Hay que notar que hemos considerado que el vertedero trapezoidal se comportaba como un vertedero rectangular.

	Triangular	Rectangular	Trapezoidal
Ecuación	$Q = 1772.603H^{5/2}$	$Q = 159.855H^{3/2}$	$Q = 235.584H^{3/2}$
Error Cuadrático medio	0.004	0.007	0.002
Cd	0.75	0.68	0.8

Tabla III.1: Características de las curvas de ajuste

III.2 – Aplicación del comportamiento en SWMM 5

La aplicación en SWMM 5 de los resultados del comportamiento de nuestros vertederos nos ha permitido obtener los resultados siguientes:

	Vertedero Triangular	Vertedero Rectangular	Vertedero trapezoidal
Coefficiente de descarga			
C_D	0.75	0.68	0.8
SWMM 5	1.78	2	2.35

Tabla III.2: Coeficientes de Descargas de los vertederos del estudio

La tabla (III.2) nos enseña los coeficientes de descargas de nuestros vertederos triangular, rectangular y trapezoidal y los coeficientes de descarga que se tienen que entrar en SWMM 5 por las simulaciones.

El caso del vertedero trapezoidal no es satisfecho cuanto al pasaje de los resultados de ensayos experimentales a simulaciones en SWMM 5. El coeficiente de descarga que hemos introducido en SWMM 5 por el caso del vertedero trapezoidal al final es: $C_w = 1.34$.

Las curvas características obtenidas en SWMM 5 han sido representadas sobre las mismas gráficas que las curvas obtenidas mediante técnicas CFD y las curvas de ensayos experimentales como se puede ver en las figuras siguientes:

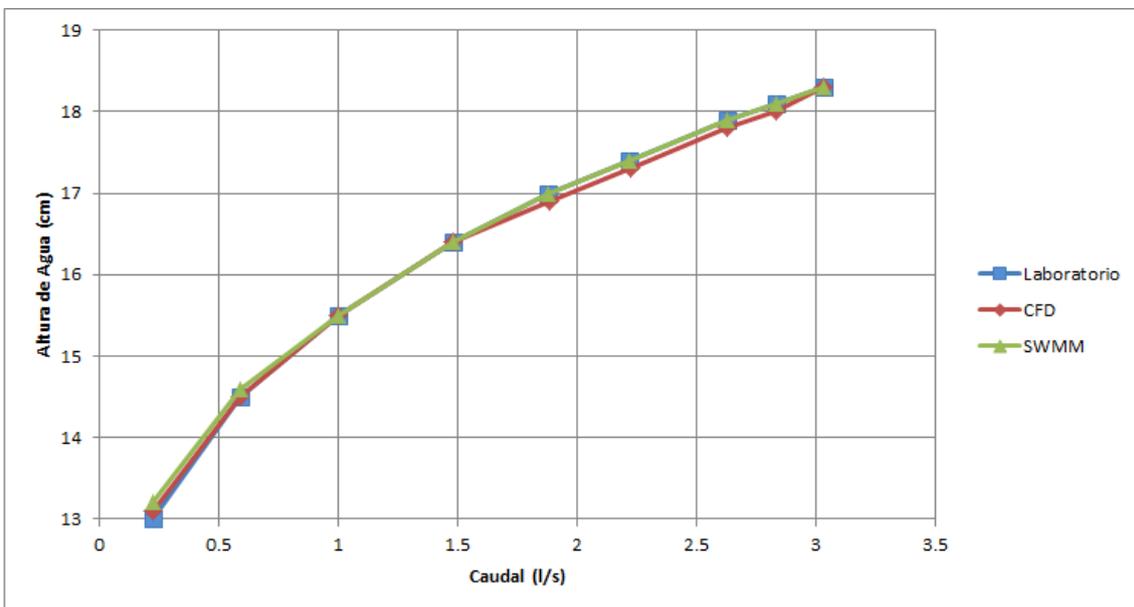


Figura III.16: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por vertedero triangular.

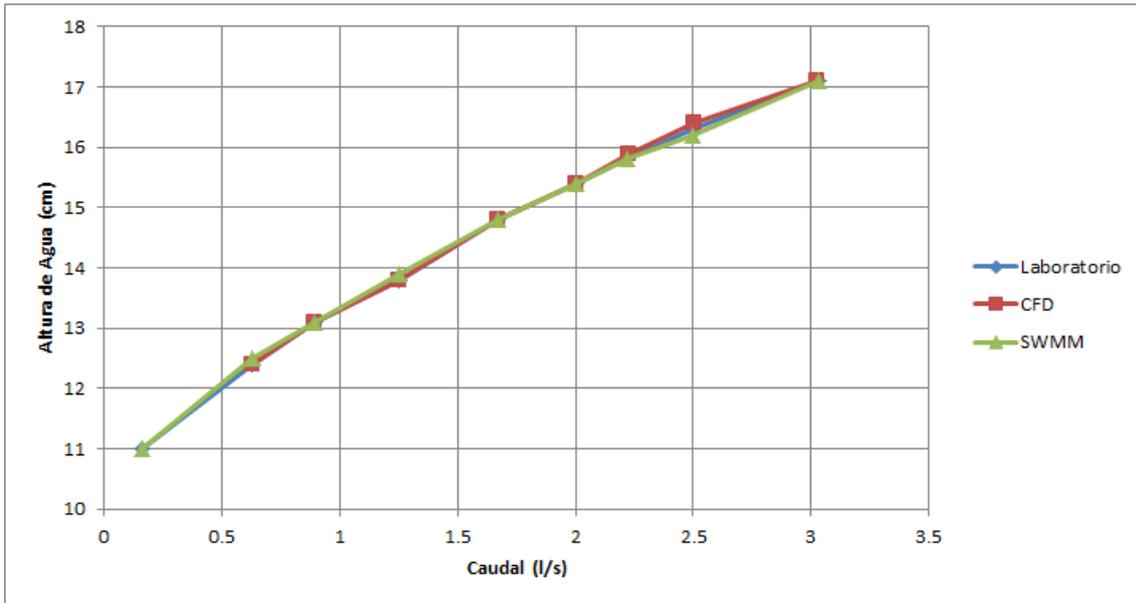


Figura III.17: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por vertedero rectangular.

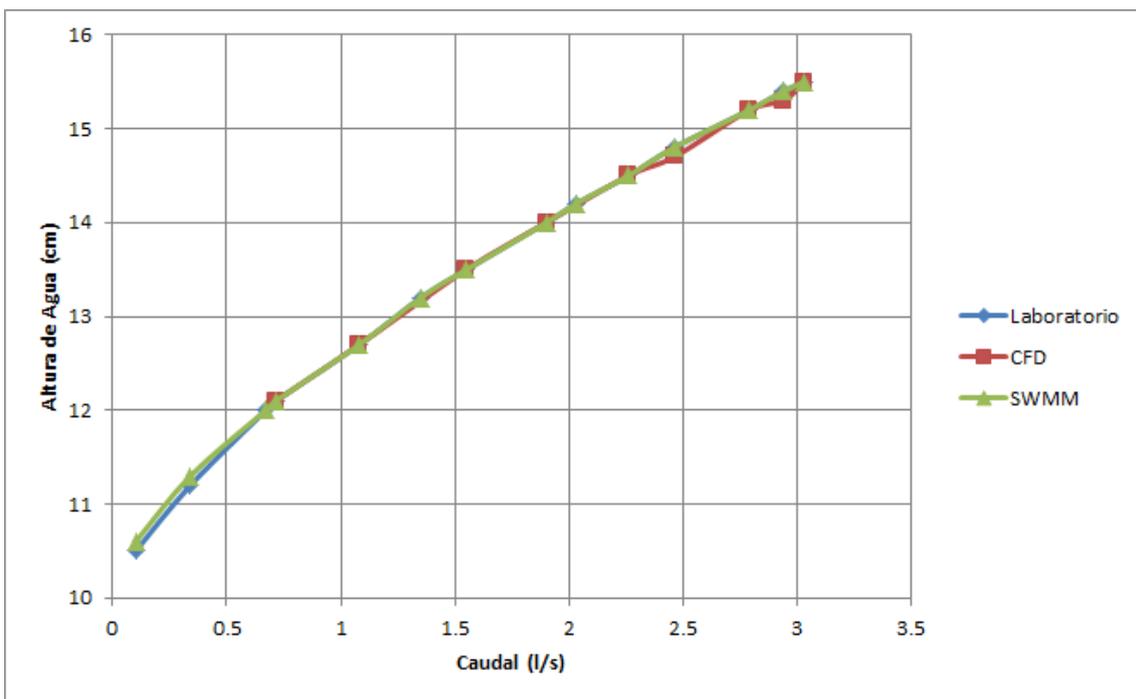


Figura III.18: Evolución de la Altura de Agua en función del Caudal de entrada por vertedero trapezoidal.

La figura (III.16), la figura (III.17) y la figura (III.18) representan las curvas de Alturas de Agua en función del caudal de entrada al canal respectivamente por los vertederos triangular, rectangular y trapezoidal.

Esas figuras también nos presentan la comparación de las curvas obtenidas mediante técnicas CFD en ANSYS R15.0 Academic, ensayos experimentales y simulaciones en SWMM 5 permitiendo así de validar el comportamiento de nuestros vertederos en SWMM 5, puesto que en los 3 casos, las 3 curvas características se superponen perfectamente.

Conclusión

En nuestro Capítulo III los resultados de caracterización de cada tipo de vertedero han sido expuestos y analizados.

Una comparación de los resultados del trabajo y aquellos de la literatura ha sido hecha para poder discutir de las expresiones de los diferentes coeficientes de descarga presenta en la literatura.

Una aplicación del comportamiento de los vertederos en SWMM 5 viene concluir este capítulo.

CONCLUSIÓN GENERAL

Llegado al final de nuestro trabajo cuyo el objetivo principal se centra en la validación de las tecnologías basadas en la dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) como alternativa para caracterizar adecuadamente los vertederos hidráulicos, podemos decir que hemos cumplido todos los pasos necesarios para alcanzar el objetivo fijado:

En la introducción general presentamos la problemática que nos ha traído a hacer este trabajo y los objetivos específicos a alcanzar al final del trabajo.

En nuestro Capítulo I, los parámetros críticos han sido definidos y el comportamiento de los vertederos hidráulicos ha sido estudiado a fin de conocer su caracterización matemática.

En el Capítulo II, la metodología empleada para llevar a cabo este trabajo ha sido presentada. El modelo experimental también ha sido presentado así como la metodología de experimentación de laboratorio y las características de los elementos del modelo. El modelo SWMM 5 ha sido calibrado y para terminar la metodología de análisis de los vertederos mediante técnicas CFD ha sido presentada y los elementos de resolución del problema detallados: La definición de la geometría, un estudio de la malla, la calibración del solver, las ecuaciones RANS que describen el flujo del agua al interior del canal y los métodos de resolución de estas ecuaciones.

El método de fracción volumétrica de agua (Volume of Fraction, VOF) que permite calcular la superficie libre del agua también ha sido detallado.

En el Capítulo III, los resultados de la caracterización de cada tipo de vertedero: triangular, rectangular y trapezoidal obtenidos han sido presentados y analizados. Comparaciones han sido hechas con resultados de la literatura también se ha realizado una validación del comportamiento de los vertederos en SWMM 5.

De estos resultados obtenidos se nota que, la diferencia que existe entre los resultados de la experimentación en laboratorio y los resultados de ANSYS R15.0 Academico es casi inexistente, lo que permite validar el procedimiento utilizado para obtener los resultados del modelo computacional en ANSYS.

De hecho, los modelos computacionales son una mejor alternativa a la utilización de dispositivos o modelos experimentales en laboratorios, puesto que permiten paliar a los problemas de construcción de laboratorios costosos y ahorrar grandes espacios y cantidades de agua y energía.

En nuestro caso la bomba podría suministrar solo $Q = 3.03$ l/s, un límite experimental que sin problema puede paliar la técnica CFD. Otra ventaja de CFD es que nos puede permitir cambiar la geometría del canal sin coste adicional de construcción.

Como expectativa, pensamos en usar las técnicas CFD para caracterizar otros elementos hidráulicos que entran en sistemas tanto de drenaje como de distribución de agua que pueden ser: orificios o ventosas.

Como otro trabajo futuro, pensamos en integrar nuestros vertederos en un sistema de drenaje o de saneamiento y simular su comportamiento con varios enfoques, para varios caudales con fin de saber cuál es el caudal límite de nuestro sistema para cada configuración. El objetivo que se pretende conseguir es diseñar sistemas de drenaje que traigan el agua en condiciones aceptables y permiten evitar probables inundaciones que afectarían el medio ambiente, destruyendo varios ecosistemas.

Debido a la actualidad, pensamos en utilizar técnicas CFD para simular algunos tramos de la red de drenaje existente de la Ciudad “Douala” en Camerún para conocer su capacidad real, mejorar su funcionamiento y hacer previsiones para posibles ampliaciones en fin de evitar inundaciones en el futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Gutiérrez, G. E. (s.f.). *Manual de hidráulica de canales*.
- [2] EPFL, L. d. (s.f.). *Hidraulique des ouvrages, canaux et cours d'eau*
- [3] Vallés, P. *Notas de Clase Hidráulica Avanzada, Flujo en lámina libre*. Universitat Politècnica de Valencia (Septiembre de 2013)
- [4] Graf, Walter. H., Altinakar M. S. *Hydraulique fluviale : écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple* (Vol. 16), *Traité de Génie Civil*, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, presses polytechniques et universitaire romanes (2000).
- [5] José Vazquez , *Hydraulique à surface Libre*, Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg.
- [6] Rugosité. (2014, juillet 7). *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. Page consultée à partir de <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rugosit%C3%A9&oldid=105265390>.
le (14:57, avril 24, 2015)
- [7] ARTURO, Rocha Felices. CANALES, TUBERIAS Y. *Hidráulica de Tuberías y Canales*. 1997.
- [8] COMOLET, Raymond. *Mécanique expérimentale des fluides*. 1976.
- [9] MARTÍNEZ RAMOS, Hernán Pedro. *Evaluación experimental de los coeficientes de gastos utilizados en fórmulas de vertederos en diferentes condiciones de operación*. 2011.
- [10] ARVANAGHI, Hadi; OSKUEI, Navid Nasehi. Sharp-Crested Weir Discharge Coefficient. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2013, Volume 3, Issue 3: 87-91
- [11] LEE, Jung-Tai, et al. Experiments on hydraulic relations for flow over a compound sharp-crested weir. *International Journal of Physical Sciences*, 2012, vol. 7, no 14, p. 2229-2237.
- [12] GHODSIAN, Masoud. Stage discharge relationships for a triangular weir. *International Journal of Civil Engineering*, 2004, vol. 2, no 1.
- [13] EL-ALFY, Kassem Salah. Effect of vertical curvature of flow at weir crest on discharge coefficient. En *9th International Water Technology Conference, IWTC9, Sharm El-Sheikh, Egypt*. 2005. p. 249-262.

- [14] AYDIN, Ismail; ALTAN-SAKARYA, A. Burcu; SISMAN, Cigdem. Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, vol. 22, no 2, p. 144-151.
- [15] RADY, Reda M. Abd El-Hady. 2D-3D modeling of flow over sharp-crested weirs. *Journal of Applied Sciences Research*, 2011, vol. 7, no 12, p. 2495-2505.
- [16] BAUTISTA-CAPETILLO, C., et al. Discharge Coefficient Analysis for Triangular Sharp-Crested Weirs Using Low-Speed Photographic Technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, vol. 140, no 3.
- [17] SWAMEE, P. K.; PATHAK, S. K.; GHODSIAN, M. VISCOSITY AND SURFACE TENSION EFFECTS ON RECTANGULAR WEIRS. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, vol. 7, no 2, p. 45-50.
- [18] ZHANG, Xin, et al. Hydraulic relations for clinging flow of sharp-crested weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, vol. 136, no 6, p. 385-390.
- [19] AZIMI, Amir Hossein; RAJARATNAM, N. Discharge characteristics of weirs of finite crest length. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, vol. 135, no 12, p. 1081-1085.
- [20] AZIMI, Amir Hossein; RAJARATNAM, Nallamuthu; ZHU, David Z. Submerged Flows over Rectangular Weirs of Finite Crest Length. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, vol. 140, no 5.
- [21] SALMASI, Farzin, et al. Discharge relations for rectangular broad-crested weirs. *Journal of Agricultural Sciences*, 2011, vol. 17, p. 324-336.
- [22] VATANKHAH, Ali R. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, vol. 23, no 1, p. 76-79.
- [23] EMIROGLU, M. Emin; AGACCIOGLU, Hayrullah; KAYA, Nihat. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow measurement and Instrumentation*, 2011, vol. 22, no 4, p. 319-330.
- [24] MOHAMMED, Ahmed Y. Numerical analysis of flow over side weir. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2015, vol. 27, no 1, p. 37-42.
- [25] HUBER, Wayne C.; ROSSMAN, Lewis A.; DICKINSON, R. A. EPA storm water management model SWMM 5. 0. *Watershed Modeling*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005, p. 339-361.

- [26] AKOZ, Mevlut Sami; GUMUS, Veysel; KIRKGOZ, Mehmet Salih. Numerical Simulation of Flow over a Semicylinder Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, vol. 140, no 6.
- [27] RAMAMURTHY, A. S.; QU, Junying; VO, Diep. Numerical and experimental study of dividing open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, vol. 133, no 10, p. 1135-1144.
- [28] GUIDE, ANSYS FLUENT User's. Version 12. *ANSYS Inc., January, 2009.*
- [29] LIPEME KOUYI, G., et al. CFD Modelling of flows in a large stormwater detention and settling basin. *NOVATECH 2010*, 2010.
- [30] KOUYI, G. Lipeme, et al. The use of CFD modelling to optimise measurement of overflow rates in a downstream-controlled dual-overflow structure. *Water Science & Technology*, 2011, vol. 64, no 2, p. 521-527.
- [31] ZOU, Lu; LARSSON, Lars. Computational fluid dynamics (CFD) prediction of bank effects including verification and validation. *Journal of marine science and technology*, 2013, vol. 18, no 3, p. 310-323.
- [32] FERZIGER, Joel H.; PERIĆ, Milovan. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin: Springer, 2002.
- [33] DE MARCHIS, M.; NAPOLI, E. 3D Numerical simulation of curved open channel flows. *WSEAS TRANSACTIONS ON FLUID MECHANICS*, 2006, vol. 1, no 2, p. 175.
- [34] WU, Weiming; RODI, Wolfgang; WENKA, Thomas. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, vol. 126, no 1, p. 4-15.
- [35] RAMAMURTHY, A. S.; QU, Junying; VO, Diep. VOF model for simulation of a free overfall in trapezoidal channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 2006, vol. 132, no 4, p. 425-428.
- [36] GOLDSCHMIT, Marcela B.; FERRO, Sergio P.; OWEN, A. Heriberto Coppola. Modelling of liquid steel flow with free surface. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2004, vol. 4, no 1, p. 12-19.