

SIMULACIÓN A ESCALA REDUCIDA DE LAS ESTRUCTURAS DE DESAGÜE  
EMBALSE DE BUCARAMANGA

MAYRA ALEJANDRA ZEA ACEVEDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA

2014

SIMULACIÓN A ESCALA REDUCIDA DE LAS ESTRUCTURAS DE DESAGÜE  
EMBALSE DE BUCARAMANGA

MAYRA ALEJANDRA ZEA ACEVEDO

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director  
Andrés Almeyda Ortiz  
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA

2014

## AGRADECIMIENTOS

A Dios,

Por permitirme concluir esta etapa de mi vida, por ser la guía durante esta etapa, brindándome la fuerza, fortaleza e inteligencia necesaria para llegar a donde estoy el día de hoy.

A mi familia,

Por darme un apoyo incondicional y ser mi más grande inspiración en este proceso de formación profesional, por ser el pilar fundamental en mi vida y nunca dejarme desfallecer, con sus palabras de ánimo y cada uno de sus consejos, sin ellos esto no hubiese sido posible.

A las niñas (Sandra y Melisa),

Por su compañía, apoyo y risas a lo largo de la carrera. Por cada uno de los recuerdos buenos y malos, y por ese bonito grupo de estudio, que hoy da el fruto más bonito, obtener el título.

A mis amigos,

Lucho, Sergio, Sebastian, Mairen, Yenner, a él por estar sin necesidad de estar y a todos aquellos que pase por alto, por los bonitos recuerdos que me quedan de esta bonita etapa en la universidad, por cada risa y palabra de apoyo, mil gracias.

A mi Director de proyecto, el Ing. Andrés Almeyda Ortiz,

Por su disposición, colaboración y apoyo durante el desarrollo del proyecto. Y al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga por permitir el intercambio de conocimiento, por medio del modelo EMBALSE DE BUCARAMANGA.

## DEDICATORIA

Quiero dedicarle este trabajo principalmente a Dios, por darme la posibilidad de culminar un propósito más, sin el esto no hubiera sido posible,

Y a mi familia, mi pilar en esta formación, a mis padres Doris y Edilberto por inculcarme valores de responsabilidad y respeto, y estar ahí en cada momento difícil. Y a mis hermanos Paola y Diego, por ser un ejemplo a seguir. A mi abuelo, por su compañía durante esta etapa de formación.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. HISTORIA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS.....	17
2. MODELO HIDRÁULICO.....	20
2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS.....	22
2.2 ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS.....	23
2.2.1 TANQUE DEL EMBALSE .....	23
2.2.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN.....	23
2.2.3 VERTEDERO DE EXCESOS (VERTEDERO MORNING GLORY).....	24
2.2.3.1 CAUDAL DE DESCARGA .....	26
2.2.4 CANAL DE EXCESOS .....	27
2.2.5 CUENCO DE AMORTIGUADOR.....	28
2.2.6 VERTEDERO DE PARED DELGADA .....	28
2.3 ESTRUCTURAS DE CONTROL .....	29
2.3.1 TANQUE DE AQUETAMIENTO .....	29
2.3.2 SISTEMA DE BOMBEO.....	30
3. MODELACIÓN.....	31
3.1 RESULTADOS DE OPERACIÓN DEL VERTEDERO .....	31
3.1.1 CONDICIONES Y VELOCIDADES DE APROXIMACIÓN DEL FLUJO.....	32
3.1.1.1 EN EL VERTEDERO .....	32
3.1.1.2 EN EL TÚNEL DE DESCARGA.....	34
3.1.2 PRESIONES .....	40
3.1.3 VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE AL AIREADOR.....	48
3.1.4 CURVA DE CALIBRACIÓN.....	49
3.2 RESULTADOS DE OPERACIÓN ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN .....	51
3.2.1 COMPORTAMIENTO TOMAS 1, 2 Y 3 CON CAUDAL DE 3,2 m <sup>3</sup> /s (ANEXO F)	52
3.2.2 COMPORTAMIENTO TOMA N°1 CON CAUDAL DE 11 m <sup>3</sup> /s (ANEXO G)	53
4. CONCLUSIONES.....	54
CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	59

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Escalamiento de las variables constructivas del modelo .....	21
Tabla 2. Escalamiento de las variables hidráulicas del modelo .....	22
Tabla 3. Relación de caudal captado por el vertedero, respecto a la cabeza de diseño .....	26
Tabla 4. Caudales fijos correspondientes a un determinado periodo de retorno ...	31
Tabla 5. Velocidad de aire medida respecto al caudal de avenida (en base al prototipo).....	49
Tabla 6. Caudales máximos de diseño de la captación .....	52
Tabla 7. Escalas del modelo .....	86
Tabla 8. Valores Característicos de Cd .....	87
Tabla 9. Datos lámina de agua en el vertedero rectangular .....	91
Tabla 10. Datos de lámina de agua en el vertedero Triangular .....	91
Tabla 11. Datos lamina de agua en el Vertedero Morning Glory .....	92
Tabla 12. Formato de Regresión .....	92
Tabla 13. Toma de Datos de Tirante .....	93
Tabla 14. Velocidad del Canal de Excesos.....	94
Tabla 15. Toma de Datos de Velocidad.....	95
Tabla 16. Datos del Tirante en el canal de Excesos .....	96
Tabla 17. Tabla de Resultados .....	97
Tabla 18. Datos de Diseño del Prototipo .....	98
Tabla 19. Toma de caudales .....	98
Tabla 20. Altura en la cresta del vertedero .....	99
Tabla 21. Tirante hidráulico en los Vertederos.....	99

## LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
<b>Imagen 1.</b> Esquema Planta Del Modelo Del Embalse (Sin Escala).....	21
Imagen 2. Relación entre el coeficiente de descarga de la cresta $C_o$ , $H_o/R_s$ para diferentes calados de aproximación.....	25
Imagen 3. Curva de Descarga del Vertedero.....	27
Imagen 4. Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un $Q=95$ m <sup>3</sup> /s	35
Imagen 5. Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un $Q=145$ m <sup>3</sup> /s .....	36
Imagen 6. Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un $Q=270$ m <sup>3</sup> /s .....	37
Imagen 7. Relación de velocidad de flujo y tirante para un $Q=1460$ m <sup>3</sup> /s. ....	38
Imagen 8. Verificación de la capacidad de trabajo del túnel de descarga .....	39
Imagen 9. Verificación del tirante hidráulico en el túnel de descarga .....	39
<b>Imagen 10.</b> Verificación de la velocidad promedio del túnel de descarga .....	40
Imagen 11. Ubicación de piezómetros en el aliviadero y túnel de descarga.....	41
Imagen 12. Ubicación de piezómetros a lo largo de la sección Bóveda .....	41
Imagen 13. Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para $Q=90$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo) .....	42
Imagen 14. Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un $Q=90$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo).....	43
Imagen 15. Monitoreo con el transductor de presión en el piezómetro G1 para un $Q=90$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo).....	43
Imagen 16. Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para $Q=145$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo) .....	44
Imagen 17. Presiones en túnel de descarga para un $Q=145$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo) .....	45
Imagen 18. Presiones en el aliviadero y túnel de descarga $Q=270$ m <sup>3</sup> /s .....	46
Imagen 19. Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un $Q=270$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo).....	46
Imagen 20. Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para $Q=1460$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo) .....	47
Imagen 21. Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un $Q=1460$ m <sup>3</sup> /s (Prototipo).....	48
Imagen 22. Curva de gasto del vertedero.....	50
Imagen 23. Esquema el Modelo Embalse de Bucaramanga .....	83
Imagen 24. Vertedero rectangular con contracción. $n=2$ .....	87

Imagen 25. Esquema de vertedero triangular.....88  
Imagen 26. Salto de Esquí presente en el modelo .....90  
Imagen 27. Canal de Excesos .....96

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Alcance del lanzamiento para un $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	73
Foto 2. Afectación a los taludes para un $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	73
Foto 3. Alcance del lanzamiento para un $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	73
Foto 4. Afectación a los taludes para un $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	74
Foto 5. Alcance del lanzamiento para un $Q=270 \text{ m}^3$ .....	74
Foto 6. Alcance del lanzamiento para un $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	75
Foto 7. Líneas de flujo en la toma No1 para un $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	77
Foto 8. Nivel mínimo de operación en la toma No 1.....	77
Foto 9. Líneas de flujo en la toma No 2 para un $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	77
Foto 10. Nivel mínimo de operación en la toma No 2.....	78
Foto 11. Líneas de flujo en la toma No 3 para un $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	78
Foto 12. Nivel mínimo de operación en la toma No 3.....	78
Foto 13. Líneas de flujo en la toma No 1 para un $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	80
Foto 14. Partículas en suspensión que no son succionadas por la captación inferior operando como descarga de fondo. ....	80

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	60
ANEXO B.....	63
ANEXO C.....	66
ANEXO D.....	69
ANEXO E.....	72
ANEXO F.....	76
ANEXO G.....	79

## RESUMEN

### TITULO:

SIMULACIÓN A ESCALA REDUCIDA DE LAS ESTRUCTURA DE DESAGÜE EMBALSE DE BUCARAMANGA.\*

### AUTOR:

Mayra Alejandra Zea Acevedo\*\*

### PALABRAS CLAVE:

Modelo hidráulico, variables hidráulicas, vertedero de excesos Morning Glory, captación.

Los modelos hidráulicos son uno de los métodos más efectivos y eficaces, para estudiar el futuro comportamiento de las estructuras hidráulicas que lo componen, puesto que por medio de ellos es posible realizar una simulación de fenómenos reales presentes en determinadas condiciones de espacio y tiempo, siendo sometidos a diferentes variaciones hidráulicas, en este sentido, esta investigación se encaminará a la verificación de las estructuras hidráulicas de desagüe del embalse de Bucaramanga, a partir de pruebas realizadas sobre el modelo a escala reducida desarrollado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A. E.S.P), localizado en sus instalaciones, analizando los resultados obtenidos en el modelamiento con respecto a las condiciones de diseño establecidas para su construcción, con el fin de verificar el buen funcionamiento de las estructuras de desagüe y captación de la presa durante el transcurso de la avenida máxima, manteniendo con ello la seguridad del prototipo. De esta manera, a partir del modelo y el escalamiento del mismo, se observa el comportamiento de la presa y en especial de sus estructuras hidráulicas (Vertedero, Captación, Vertederos de Exceso). Teniendo en cuenta este estudio, y la posibilidad de que el modelo haga parte de los laboratorios de hidráulica de la Universidad Industrial De Santander, se generará una guía de laboratorio que será incorporada al laboratorio de Hidráulica de la Universidad Industrial De Santander con la finalidad de realizar un aporte académico y de conocimientos a la institución.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad Físico-Mecánicas – Escuela de Ingeniería Civil – Director: Andrés Almeyda Ortiz Ing. Civil.

## ABSTRACT

**TITLE:**

SIMULATION OF SMALL SCALE STRUCTURE DRAIN DAM BUCARAMANGA\*

**AUTHOR:**

Mayra Alejandra Zea Acevedo\*\*

**KEYWORDS:**

Hydraulic model, hydraulic variables, spillway, morning glory, capture.

Hydraulic models are one of the most effective and efficient methods to study the future behavior of the hydraulic structures that compose, through them it is possible to perform a simulation of phenomena real present in certain conditions of space and time, being subjected to different hydraulic variations, in this way, this research is going to be focused to the verification of hydraulics structures of Bucaramanga's reservoir, using testing on the reduced model developed by the "Acueducto Metropolitano de Bucaramanga" (amb S.A E.S.P), located on its premises, analyzing the results of the modeling with respect to the design conditions established for its construction, this is made to verify the well operation of the drainage structures and capturing of the during the maximum flood, keeping with this safe the prototype. Thus, from the model and scaling it, the behavior of the dam and its hydraulic structures (weir, Uptake, and excess landfill) can be observed. Considering this study and the possibility that the model becomes part of the hydraulic labs of Universidad Industrial de Santander, a guide would be created to be incorporated into the hydraulic lab of University, by this a knowledge and academic contribution is going to be incorporated to the University.

---

\* Project Degree

\*\*Physical-Mechanical Faculty - School of Civil Engineering - Director: Andrés Ortiz Almeyda

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es muy fácil observar como el calentamiento global y las innumerables afectaciones ambientales han reducido en gran proporción las fuentes de abastecimiento de agua potable. En Colombia se ha desarrollado la construcción de cerca de 20 embalses destinados a la captación del recurso hídrico, tanto para generación de energía como para el abastecimiento de agua potable de la población, como es el caso del Embalse de Bucaramanga. El constante crecimiento poblacional del área metropolitana de Bucaramanga<sup>[1]</sup> y el progresivo aumento en el consumo del recurso hídrico ha motivado un ambicioso proyecto de abastecimiento de agua, que consiste en la captación de agua de la afluyente del Rio Tona, localizado en la vereda Retiro Grande, en el Municipio de Bucaramanga, a partir de una presa de enrocado y cara de concreto de 103.6 metros de altura aguas arriba de la fuente, a 600 m de la confluencia de los ríos Toná y Suratá, la cual almacenará un volumen de 17,6 millones de metros cúbicos y regulará un caudal de 1.200 litros por segundo, adicionales al sistema de Acueducto existente, asegurando el suministro prolongado de 20 años a los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. En efecto, dada la importancia y complejidad del proyecto, se desarrolló la construcción del modelo hidráulico Embalse de Bucaramanga bajo la condición de un modelo físico de escala geometría 1:50, para observar que su funcionamiento sea el adecuado; desarrollándose una serie de estudios sobre las estructuras hidráulicas, captación, vertedero de excesos y el cuenco dissipador para estimar posibles alteraciones en su puesta en marcha, que puedan ser corregidas en el proceso constructivo que actualmente se desarrolla.

En este margen de ideas, el proyecto se encaminará a la verificación de las estructuras hidráulicas del Embalse de Bucaramanga Rio Tona, a partir de pruebas realizadas sobre el modelo, analizando la capacidad de transportar y regular las crecientes máximas del cauce, así como el buen funcionamiento del



vertedero de excesos, manteniendo con ello la seguridad la presa, reduciendo con ello la afectación de la erosión del cauce aguas debajo de la presa.

## 1. HISTORIA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

La hidráulica es aplicada desde las civilizaciones más antiguas, ésta presente en los resguardos localizados a orillas de grandes afluentes hídricas, que luego contribuirían a la principal fuente de abastecimiento de estas sociedades, la agricultura, a partir del riego trazado por medio de zanjas realizadas por ellos mismos.

Entre 4000 y 2000 A.C los egipcios ya desarrollaban puertos y estructuras de riego, abriendo con ellos camino a la elaboración de modelos matemáticos y físicos, de estructuras hidráulicas, no obstante, fue hasta el siglo XVI que se desarrollaron los primeros principios de hidráulica, siendo perfeccionadas por científicos como Newton, Bernulli y Euler; a partir de los cuales en 1885 Reynolds consiguió desarrollar el modelo del río Merssey, concluyendo que la relación existente entre la fuerza de inercia y la resistencia a la deformación tangencial de un fluido (Viscosidad), son fundamentales en el diseño de modelos hidráulicos, puesto que por medio de ella, se determina si se requiere modelar un comportamiento laminar o turbulento; al igual que Reynolds, Froude en 1870 concluyó que la relación existente entre la fuerza de inercia y la gravedad, tenía un impacto importante en la generación de estándares, dándose con ello la formulación del número de Froude para establecer el estado del flujo hidráulico.<sup>[2]</sup>

A partir de estos estudios y conclusiones, a través del tiempo se fueron desarrollando modelos hidráulicos, principalmente con fines académicos, para demostrar la aplicabilidad de los mismos en los fenómenos reales, así como la verificación de la teoría, en la práctica. (Ven te Chow, 1994)

En general un modelo hidráulico a escala tiene como principal objetivo la simulación de las situaciones presentes en el prototipo con el fin de mejorar las condiciones negativas en el mismo. De esta manera, para que un modelo sea

viable, es necesario que exista una correlación con el prototipo, en sus aspectos más relevante, en este caso se ajusta escalarmente a sus dimensiones generándose un modelo hidráulico de carácter físico ajustado bajo la semejanza de Froude, siendo este uno de los principales parámetros de control [3][4], planteándose con ello que tanto el Valor de Froude para el modelo como el prototipo sean igual a 1. Obteniéndose con ello las siguientes relaciones de escalamiento:

- Relación de longitud

$$L_r = \frac{L_p}{L_m}$$

- Relación de Velocidades

$$V_r = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\sqrt{L_p}}{\sqrt{L_m}} = (L_r)^{1/2}$$

- Relación de Áreas

$$A_r = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^2 = L_r^2$$

- Relación de Volúmenes ( $V_r$ );

$$V_r = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3 = L_r^3$$

- Relación de Tiempo

$$T_r = (L_r)^{1/2}$$

- Relación de Caudal

$$Q_r = V_r * A_r = (L_r)^{\frac{1}{2}} * (L_r)^2 = (L_r)^{\frac{5}{2}}$$

- Relación de Fuerza

$$F_{zr} = \frac{F_{zp}}{F_{zM}} = (L_r)^3$$



- Relación de Presión

$$P_r = \frac{F_{zr}}{A_r} = L_r$$

- Relación de Cabeza de Presión

$$CP_r = \frac{CP_p}{CP_m} = L_r$$

- Relación de Cabeza de Velocidad

$$CV_r = \frac{CP_p}{CP_m} = L_r$$

## 2. MODELO HIDRÁULICO

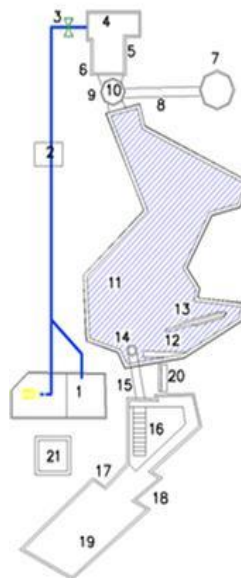
El modelo hidráulico del Embalse de Bucaramanga se encuentra ubicado en las instalaciones del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, esta cuenta con un área dispuesta tanto para la presa, como para los instrumentos de medición, captación y disipación.

El modelo conserva cada una de las estructuras hidráulicas del prototipo, distribuidos en dirección del flujo de la siguiente manera se inicia con (1) Una bomba de capacidad 100 l/s, para la recirculación del sistema, (2) un caudalímetro para la determinación del caudal en tiempo real, (3) una servo-válvula para controlar el caudal que ingresa al modelo,(4) un tanque de aquietamiento en el cual se regulara el caudal que ingresa al modelo, (5) un sensor de nivel de ultrasonido para medir la lámina de agua generada, (6) un vertedero de pared delgada para obtener una segunda medida del caudal que entra al modelo, (7) una tolva y dosificador incorporados en una estructura metálica para suministrar de manera controlada los sedimentos,(8) una banda transportadora que llevara los sedimentos al (9) tanque mezclador. El cual mediante el (10) agitador mecánico incorporará los mismos al modelo.

El (11) tanque del embalse, al igual que la presa (12), la (13) captación y el (14) vertedero de excesos Morning Glory, del cual surge el canal de excesos (15) que termina en el cuenco disipador (16), compuesto de un vertedero de pared delgada (17), con el cual se determinará el caudal de excesos, se cuenta también con un (18) vertedero de pared delgada que se encarga de aforar el caudal generado en la aducción, descargando este en los dos tanques (19) que recuperan el sedimento.Finalmente junto al canal de excesos, se localiza los piezómetros (20) para determinarlas presiones generadas y (21) una oficina donde se encuentran el centro de control.

Para el desarrollo del modelo, se tuvo en cuenta las medidas, caudales y especificaciones del prototipo dando con ellos los siguientes escalamientos en relación al modelo y prototipo. Estas escalas ajustadas a las proporcionadas por la Universidad Nacional en la tabla 2.1 del memorando técnico número 11<sup>[5]</sup> Y a partir de las relaciones estipuladas por un modelo a semejanza de Froude.

**Imagen 1.** Esquema Planta Del Modelo Del Embalse (Sin Escala)



**Tabla 1.** Escalamiento de las variables constructivas del modelo

<b>Variables Constructivas</b>	<b>Escala</b>
Longitud	1:50
Área	1:2500
Volumen	1:125000

**Tabla 2.** Escalamiento de las variables hidráulicas del modelo

<b>Variables Hidráulicas</b>	<b>Escala (Prototipo:Modelo)</b>
Tiempo	1:7.071
Caudal	1:17677.670
Velocidad	1:7.071
Presión	1:50
Fuerza	1:125000
Cabeza de Presión	1:50
Cabeza de Velocidad	1:50
Caudal Del Río	1.1[m <sup>3</sup> /s]:0.062[l/s]
Captación	3.2[m <sup>3</sup> /s]:0.181[l/s]
Vertedero Q <sub>máx</sub>	1500[m <sup>3</sup> /s]:85[l/s]

## 2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS

A partir de los estudios previos realizados por las firmas Integral S.A y Consultores Ponce de León, descritos en los memorandos técnicos entregados a la firma constructora del proyecto, CONALVIAS S.A, y los ajustes realizados bajo los criterios de los asesores Ingeniería José Salas y Germán Gavilán, se pudo determinar que el diseño de la presa y sus componentes hidráulicos estarían adaptados a un periodo de precipitación máxima de intensidad de lluvia aproximadamente de 272mm, dando como resultado un CMP de 1500 m<sup>3</sup>/s (95 l/s en el modelo), valores correspondientes a las aproximaciones obtenidas por medio de los hidrogramas de SCS y Clark<sup>[6]</sup>; motivo por el cual el diseño del modelo, se ajustó de igual forma a estas condiciones, a partir de los escalamientos señalados anteriormente; se seleccionó para ello un vertedero sin compuertas capaz de evacuar en su totalidad el caudal de excesos, presente en la avenida máxima del proyecto Embalse de Bucaramanga (Río Tona), en este caso se presenta un

vertedero Morning Glory, el cual entregará mencionado caudal al cuenta amortiguador.

## 2.2 ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

### 2.2.1 TANQUE DEL EMBALSE

El área del prototipo está enmarcada en  $195 \text{ Km}^2$ , con lo cual el modelo asemeja la misma en base a la escala establecida para el mismo (1:2500), de igual forma representa la topografía del terreno a inundar, así como las estructuras hidráulicas dispuestas en el mismo (Vertedero de excesos y bocatoma de captación).

**Foto 1.** Tanque Del Embalse



### 2.2.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN

El sistema de captación está localizado sobre el margen izquierdo de la presa, compuesto por 3 bocatomas a diferentes niveles del embalse, haciendo posible un caudal de captación de  $0.818 \text{ l/s}$  en el modelo y  $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$  en el prototipo, y  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo) sobre la bocatoma inferior que opera como desagüe de fondo.

**Foto 2.** Sistema de Captación, por medio de 3 bocatomas.



### 2.2.3 VERTEDERO DE EXCESOS (VERTEDERO MORNING GLORY)

Este vertedero se encargara de la evacuación total de creciente máxima para la cual fue diseñada el prototipo (1500 m<sup>3</sup>/s), para el modelo un caudal de 95 l/s, ello teniendo en cuenta que no posee compuertas y su descarga es total en el canal de excesos, y posteriormente es entregado al cuenta de amortiguación.

**Foto 3.** Vertedero Morning Glory



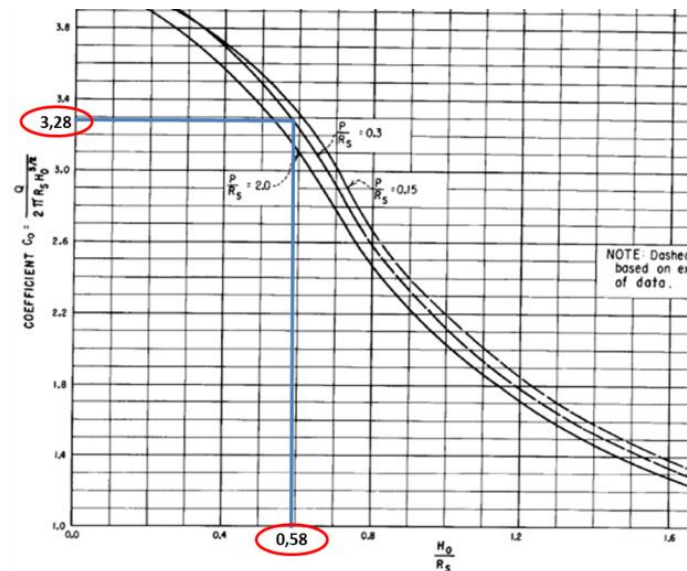
En las condiciones del prototipo, se tiene que  $Q = \left(\frac{R}{0,275}\right)^2 * Ha^{0,5}$  (Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior), donde los valores de R y Ha, varían de acuerdo a las condiciones de funcionamiento.

Cabeza de diseño del vertedero (H): En este caso es de 5,80 m, correspondientes a la diferencia de altura entre la cresta del vertedero (cota 885,80) y el nivel máximo extraordinario del embalse (cota 891,60).

Altura de la estructura vertedora (P): Corresponde a la diferencia de altura entre la plazoleta de aducción (cota 883,00) y la cresta del vertedero (cota 885,80). En este caso de 2,80 m.

La relación entre el coeficiente de descarga para cresta circular, la cabeza de diseño, la altura de la estructura y el radio de la cresta se obtiene a partir de los nomogramas realizados por el Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior.

**Imagen 2.** Relación entre el coeficiente de descarga de la cresta  $C_o$ ,  $H_o/R_s$  para diferentes calados de aproximación.



**Fuente:**Bureau of Reclamation del U.S. Department of the Interior.

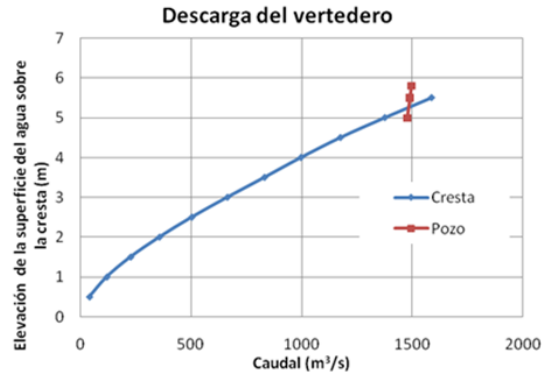
### 2.2.3.1 CAUDAL DE DESCARGA

Este está representado por el caudal que pueda descargar por la cresta del vertedero y la sección de control del pozo.

**Tabla 3.** Relación de caudal captado por el vertedero, respecto a la cabeza de diseño

Carga sobre la cresta (m)	Cresta			Pozo	
	He/Re	C	Q (m <sup>3</sup> /s)	He (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0,5	0,05	3,39	40	23,4	
1	0,10	3,58	118	23,9	
1,5	0,15	3,71	225	24,3	
2	0,20	3,81	356	24,8	
2,5	0,25	3,85	502	25,2	
3	0,30	3,86	663	25,7	
3,5	0,35	3,84	831	26,1	
4	0,40	3,77	996	26,6	
4,5	0,45	3,72	1174	27	
5	0,50	3,72	1375	27,5	1476
5,5	0,55	3,72	1587	27,9	1488
5,8	0,58			28,2	1496

**Imagen 3.** Curva de Descarga del Vertedero



### 2.2.4 CANAL DE EXCESOS

El canal de Excesos o canal de descarga, se encuentra localizado a la salida del vertedero de excesos, y presenta tres secciones transversales características, inicialmente circular de diámetro 18cm (Modelo) con una longitud de 64.44cm, una transición entre la sección circular y la tipo baúl de 30 cm de largo (Prototipo 15,0 m) y el último tramo de sección tipo baúl de 5,04 m de longitud (Prototipo 252,0 m) para culminar en el salto de esquí que entrega el flujo al cuenco amortiguador

**Foto 4.** Canal de Excesos. P = 6.8%



### 2.2.5 CUENCO DE AMORTIGUADOR

La topografía del cuenco fue reproducida a partir de arcilla compactada, para progresivamente ser revestido en concreto, cuenta con una base de grava, por medio de la cual se analiza la entrega del flujo desde el canal de excesos.

**Foto 5.** Cuenco de Amortiguamiento



### 2.2.6 VERTEDERO DE PARED DELGADA

El modelo está compuesto por tres vertederos de pared delgada que medirán los caudales a la entrada y salida del mismo, con ello se mantiene un control de error en el mismo; uno de ellos triangular en la salida de aducción, y los siguientes rectangulares, uno a la entrada del embalse y el faltante al final del cuenco de amortiguamiento para aforar del caudal de excesos.

**Foto 6.** Vertedero de Pared Delgada, Localizado en la entrada del Embalse.



**Foto 7.** Vertedero de Pared Delgada, Localizado al final del cuento de amortiguamiento.



**Foto 8.** Vertedero Triangular de pared Delgada



La calibración de estos vertederos se realizó por medio de la ecuación 1<sup>[7]</sup>, en función de la altura de la lámina de agua “H”, y de las constantes de calibración “C” y “n”.

$$Q = C * H^n \quad (1)$$

## 2.3 ESTRUCTURAS DE CONTROL

### 2.3.1 TANQUE DE AQUIETAMIENTO

La función principal del tanque de quietamiento, es homogenizar el flujo bombeado, a través de la pared de grava que separa el nivel superior del tanque,

para progresivamente ser aforado por medio de un vertedero de pared delgada e igualmente del caudalímetro.

### **2.3.2 SISTEMA DE BOMBEO**

El sistema de bombeo posee una capacidad de 100 l/s, encargándose de la recirculación del flujo a través del modelo, por medio de una tubería de impulso de 10", ésta tubería cuenta con 3 válvulas de control a lo largo de su longitud, inicialmente una válvula mariposa y de cheque, que impide el retorno del flujo a la bomba, evitando daños en el sistema de bombeo, y una servo-válvula antes de la entrada al tanque de quietamiento, que permite la regulación del caudal que ingresa al embalse.

### 3. MODELACIÓN

#### 3.1 RESULTADOS DE OPERACIÓN DEL VERTEDERO

Luego de conocer y comprender los componentes y estructuras hidráulicas del modelo, por medio de la verificación del respectivo escalamiento, se llevó a cabo la simulación del mismo, representando los caudales correspondientes a diferentes periodos de retorno, y finalmente verificando que el aliviadero, conformado por el vertedero, el pozo y el túnel de descarga tengan la capacidad de evacuar la creciete máxima del proyecto. En este sentido se tiene:

**Tabla 4.** Caudales fijos correspondientes a un determinado periodo de retorno

PERIODO DE RETORNO	Q PROTIPO $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Q MODELO $\frac{l}{s}$
5	90	5.09
10	145	8.2
50	270	15.27
CMP	1460	82.6

En la simulación se seleccionan los caudales mencionados en la “tabla 5” con periodos de retorno tempranos, para observar el comportamiento del flujo en los taludes del cuenco de erosión y finalmente la CMP, para verificar las condiciones de las estructuras hidráulicas al presentarse la avenida máxima del proyecto.

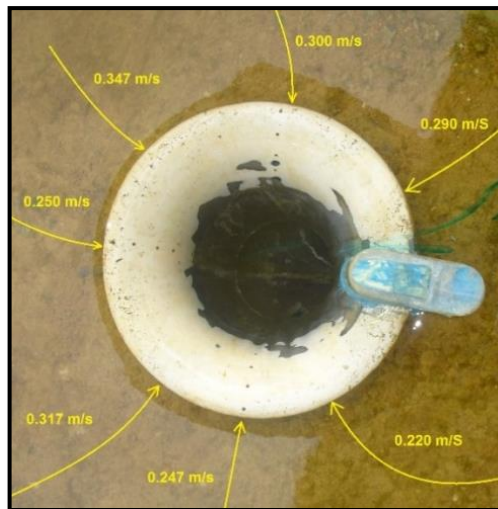
### 3.1.1 CONDICIONES Y VELOCIDADES DE APROXIMACIÓN DEL FLUJO

#### 3.1.1.1 EN EL VERTEDERO

Para determinar las velocidades de aproximación a la cresta del vertedero se hizo uso de diferentes trazadores, a partir de los cuales distinguir el recorrido del flujo, su velocidad fue determinada a partir de diferentes tomas de recorridos de espacio y tiempo tomados por el trazador para llegar a la cresta. Para estas tomas, se tuvo en cuenta que la velocidad límite de aproximación al vertedero suministrada por el diseño es aproximadamente 2 m/s(modelo 0.3 m/s).

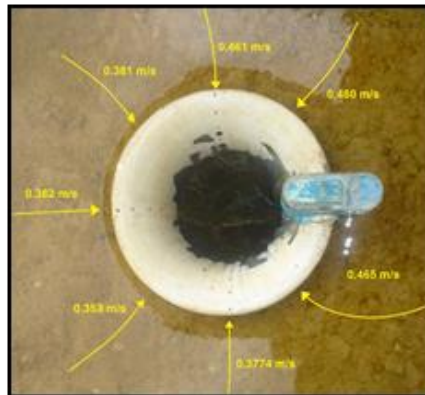
Se inicia con un caudal de 90 m<sup>3</sup>/s (modelo 5,09 l/s) obteniendo rangos de velocidades entre 0,22 y 0,35 m/s en el prototipo, sin observarse desprendimientos del flujo.

**Foto 9.** Velocidad de Aproximación para T= 5 años (Velocidad del Prototipo)



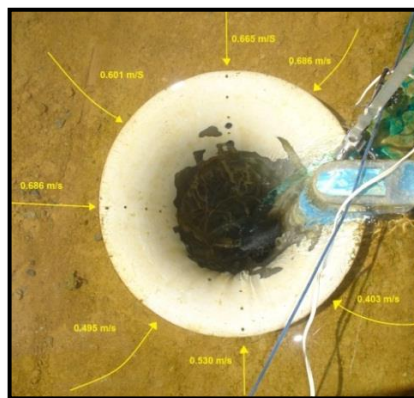
Posteriormente se simuló un caudal de 145 m<sup>3</sup>/s (8,2 l/s modelo) y se observaron condiciones hidráulicas similares al anterior corrimiento pero como es lógico se produjo un incremento de la velocidad de aproximación encontrando, enmarcadas en un rango entre 0,35 y 0,48 m/s.

**Foto 10.** Velocidad de Aproximación para T=10 años



La tercera simulación se realizó para un caudal de 270 m<sup>3</sup>/s (15,27 l/s modelo) evidenciado que el flujo continua aproximándose homogéneamente, no obstante, se comienza a observar perturbaciones al lado derecho del vertedero y alrededor de la pila. El vertedero se comporta a lámina libre con control sobre el labio fijo. En este caso se registraron velocidades de aproximación entre 0,40 y 0,69 m/s.

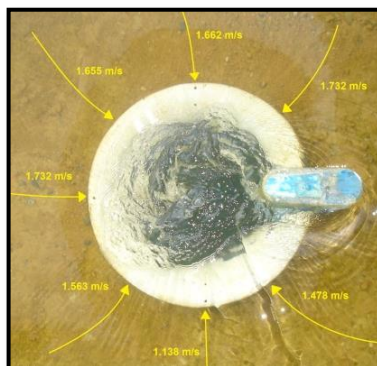
**Foto 11.** Velocidad de Aproximación para T=50 Años



La cuarta simulación se realizó para un caudal 1460 m<sup>3</sup>/s (82,6 l/s modelo), “este caudal es el máximo valor del hidrógrama de salida del embalse o el máximo caudal desaguado después de la laminación del embalse”; durante el proceso se observó que el cuerpo y pozo del aliviadero se ahogan completamente, el flujo es fluctuante debido a que se está expulsando el aire libre que conformaba el

volumen de la garganta del vertedero, el pozo y el túnel de descarga. Antes de llegar a este valor pico de caudal se observó un flujo alterado e irregular con vórtices al costado derecho y cercano a la pila de aireación pero a medida que se iba evacua el aire dentro del pozo y alcanza un flujo presurizado (forzado) desde el inicio de la junta conformada por codo y el túnel de sección circular hasta el labio fijo del aliviadero, el flujo se estabilizaba a medida que se incrementa la altura de la lámina de agua sobre el azud. En este caso, se observaron velocidades de aproximación entre 1.14 hasta 1.73 m/s. con esta última simulación se verifica que las velocidades de captación del vertedero como se observaba en los informes técnicos de diseño del proyecto, suministrados por la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), en su memorando técnico N° 11, no excediera 2m/s (0.3 m/s en el modelo). Manteniéndose con ello las especificaciones del diseño.

**Foto 12.** Velocidades de Aproximación del flujo para la CMP

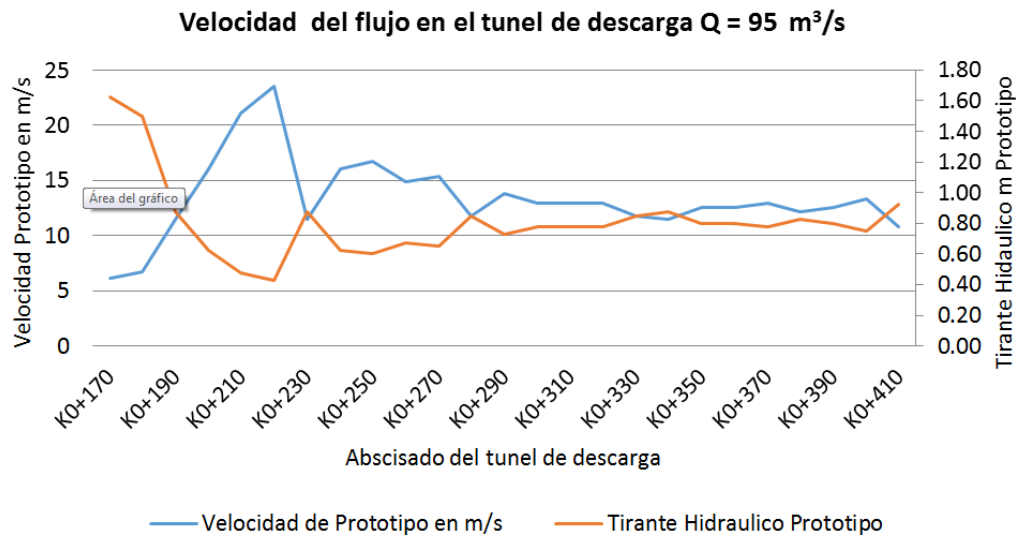


### 3.1.1.2 EN EL TÚNEL DE DESCARGA

Se determinó la velocidad del flujo implícitamente a través de la ecuación de continuidad o conservación de la masa, ya que se dispone de datos de caudal, medidos en el caudalímetro ultrasónico y corroborados en los diferentes vertederos y a su vez el área mojada, la cual se establece con los perfiles de flujo

medidos en el canal de acrílico. Con éstas dos variables se obtuvo valores de velocidad con la intención de verificar que sean inferiores a los 30 m/s (Modelo 4.25 m/s). Igualmente, se corroboró que la lámina de agua en el canal no excediera el 70% de su capacidad, durante la CMP.

**Imagen 4.** Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un  $Q=95 \text{ m}^3/\text{s}$



Para un caudal de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ , el máximo valor de velocidad fue de  $23,57 \text{ m/s}$  ( $3,33 \text{ m/s}$  Modelo) que se evidenció en la abscisa ( $Ko + 220$ ), en la sección de tipo baúl y con un tirante hidráulico de  $0,43 \text{ metros}$ .

Las máximas alturas se deben a la formación de una onda diamanté o cruzada provocada por el abrupto cambio de pendiente en el fondo del vertedero ya que pasa de una pendiente vertical a una pendiente baja ( $<10\%$ ), lo que origina una sobre elevación que inicia desde el codo y se propaga por el túnel de sección circular, la transición para finalizar en la abscisa  $Ko + 200$  sobre la sección tipo baúl.

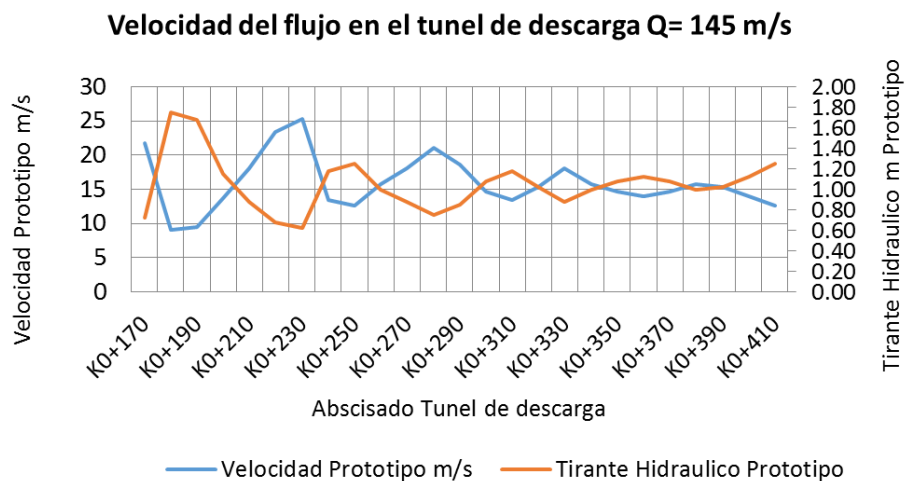
**Foto 13.** Formación Diamante a lo largo del canal de excesos  $Q=95 \text{ m}^3/\text{s}$



El tipo de flujo característico de estas velocidades es rápido o supercrítico con números de Froude superiores a uno (1).

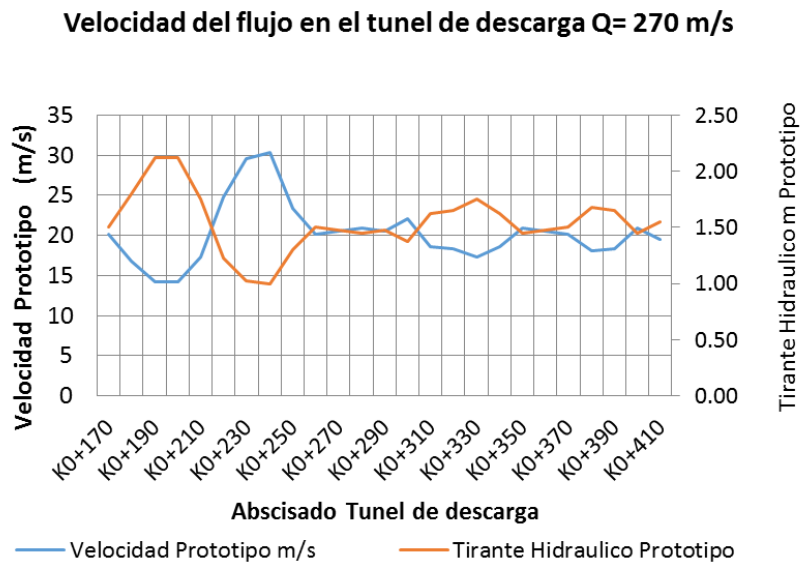
Para un caudal de  $145 \text{ m}^3/\text{s}$ , el máximo valor de velocidad se evidencio en la abscisa (Ko + 230) en la sección de tipo baúl con un tirante hidráulico de 0,625 metros (1.25 cm Modelo) y con una velocidad de 25,26 m/s (3,57 m/s Modelo). En este caso, también se pudo observar la onda diamante sobre el canal, terminando en la abscisa Ko+220.

**Imagen 5.** Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un  $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$



Para un caudal de 270 m<sup>3</sup>/s, el máximo valor de velocidad se evidencio en la abscisa (Ko + 240) en la sección de tipo baúl con un tirante hidráulico de 1,0 m (2 cm Modelo) y con una velocidad de 30,33 m/s (4,29 m/s Modelo). Aunque la velocidad máxima supera la proyectada en el diseño esta solo representa un valor puntual ya que la velocidad promedio sobre el canal es de 20,28 m/s (2,87 m/s Modelo).

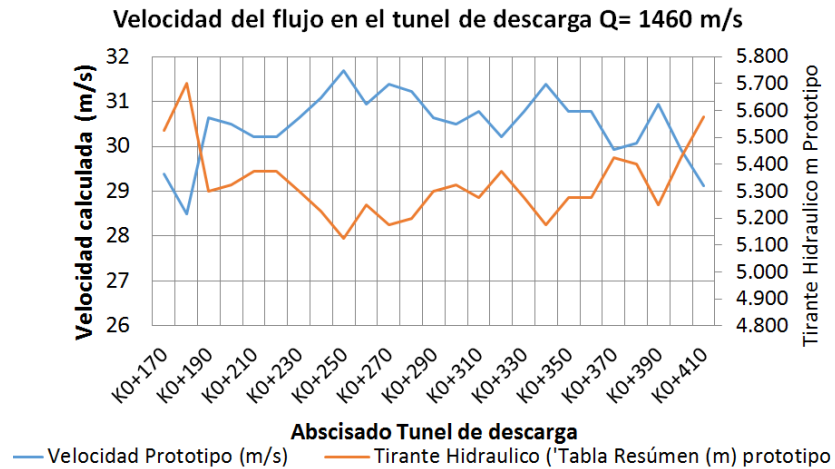
**Imagen 6.** Relación de velocidad de flujo y tirante hidráulico para un Q=270 m<sup>3</sup>/s



Para un caudal de 1460 m<sup>3</sup>/s, la distribución de presiones a lo largo del túnel de descarga es presenta valores uniformes con la longitud es decir los datos de velocidad oscilan en un rango comprendido entre 28,5 y 31,7 m/s, hallando un valor promedio de 30,45 m/s, valor muy cercano a proyectado en el diseño de 30 m/s. Se observa un tirante hidráulico uniforme con un valor promedio de 5,33 m (10,66 cm, Modelo)

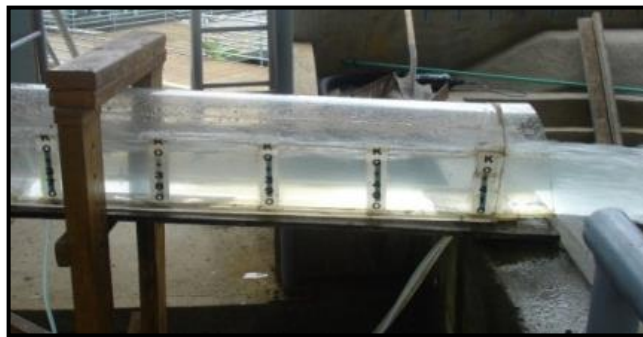
La sobre elevación causada por la onda diamante inicia desde el codo y se propaga por el túnel de sección circular, la transición para finalizar en la abscisa Ko + 250 sobre la sección tipo baúl.

**Imagen 7.** Relación de velocidad de flujo y tirante para un  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Al presentarse la condición de  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$ , el flujo en el aliviadero es forzado, y fluctuante, debido a la expulsión del aire presente, lo cual genera que el canal de excesos trabaje a presión hasta la abscisa  $K0+120$ , por efecto del caudal evacuado.

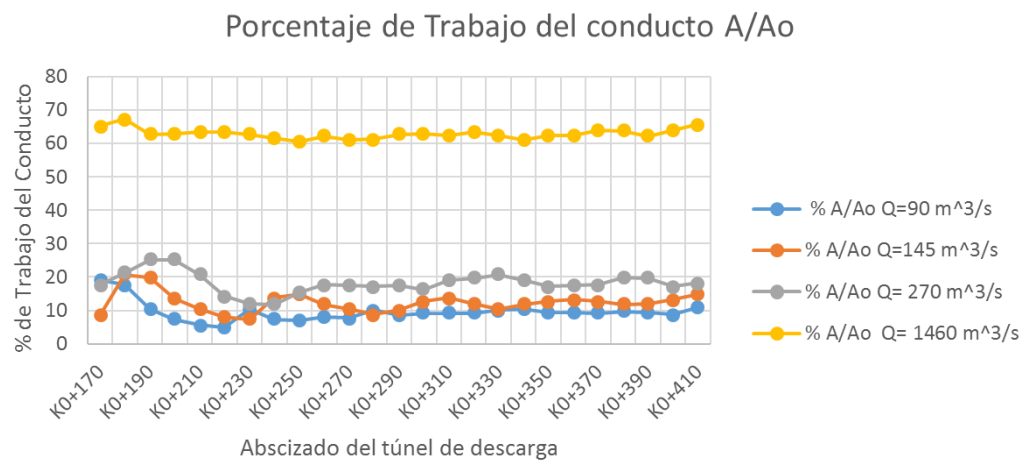
**Foto 14.** Perfil del flujo el túnel de descarga para la CMP de  $1460 \text{ m}^3/\text{s}$



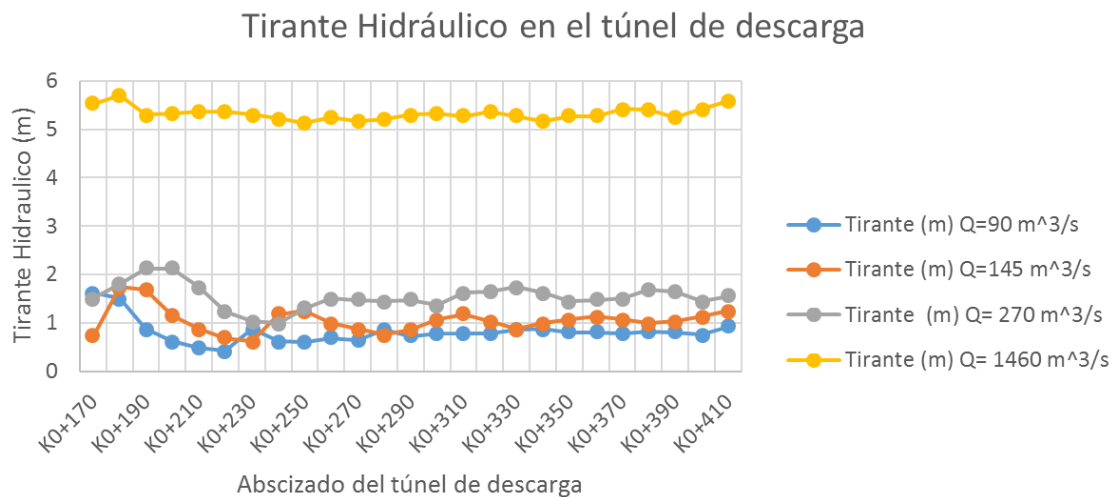
Con la finalidad que el túnel de descarga trabaje siempre en lámina libre, en el diseño se limitó su capacidad al 70% del área de la sección transversal, por lo

tanto se verifico esta condición en el modelo reducido para las cuatro condiciones de caudal, esto se hizo calculando el área mojada para cada perfil de flujo (A) y dividiéndola en el área total de la sección (Ao), la cual es de 76,18 m<sup>2</sup> (Prototipo), este porcentaje se calculó a partir del Ko + 170 fuera de las perturbaciones del flujo generadas por el cambio de sección y la influencia de la onda diamante.

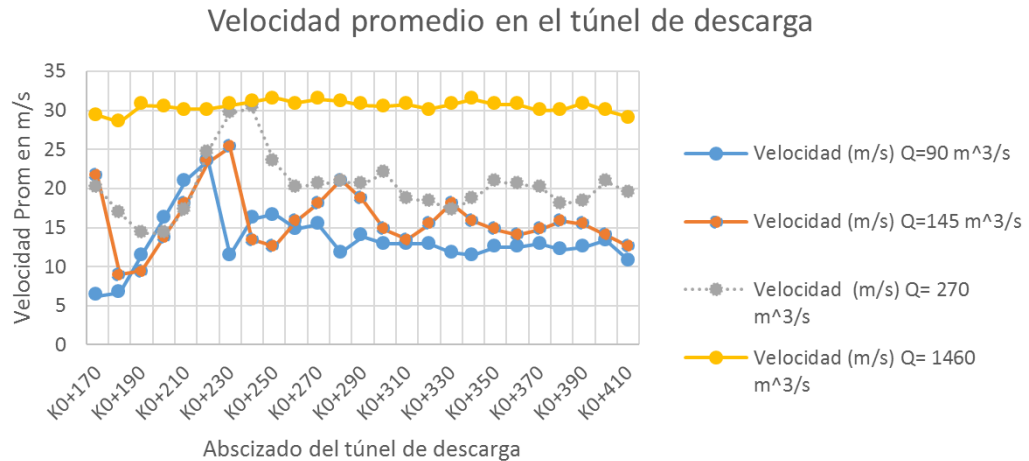
**Imagen 8.** Verificación de la capacidad de trabajo del túnel de descarga



**Imagen 9.** Verificación del tirante hidráulico en el túnel de descarga



**Imagen 10.** Verificación de la velocidad promedio del túnel de descarga

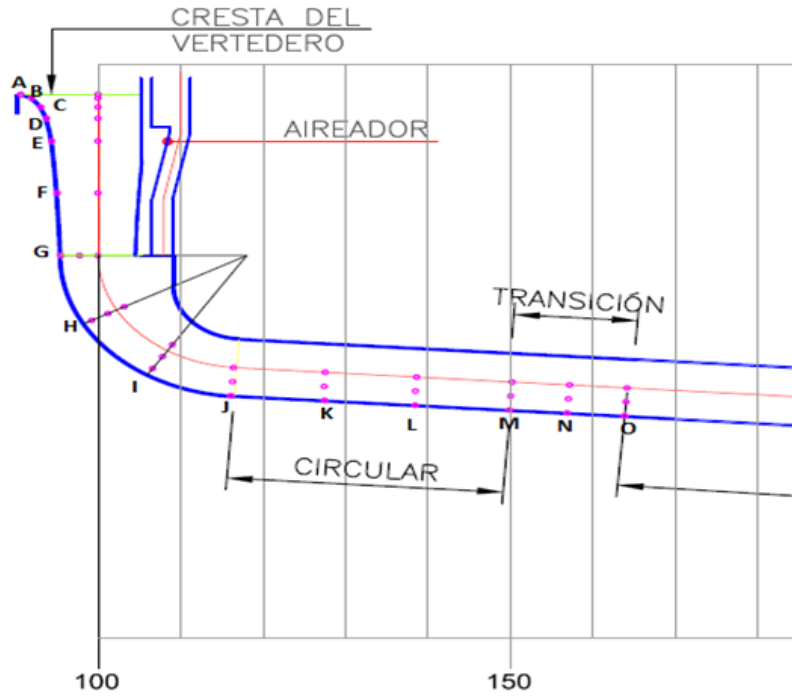


En las imágenes 9 y 10, se observan los tirantes hidráulicos y la velocidad promedio para los diferentes caudales simulados, y se evidencia que para caudales inferiores a la CMP se presentan variaciones altas de velocidad entre las abscisas comprendidas entre el Ko+190 y Ko+250, por lo tanto es necesario reforzar este tramo para evitar problemas de erosión en el concreto. Sin embargo, es necesario chequear el efecto de la cavitación en esta zona que presenta velocidades altas.

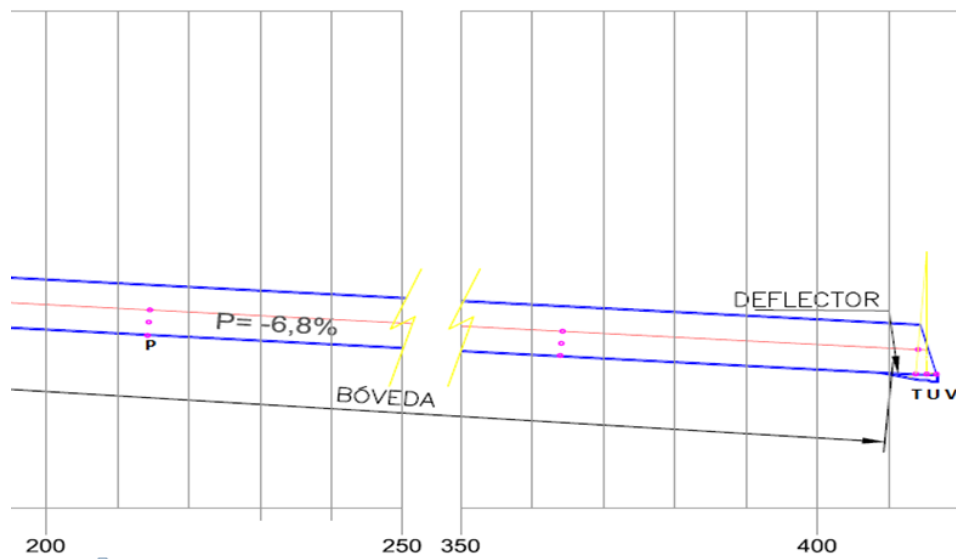
### 3.1.2 PRESIONES

En las imágenes 11 y 12, se observan las localizaciones de los piezómetros a lo largo del aliviadero y el túnel de descarga. Se determinaron 22 ejes transversales con 3 puntos de medición de presión excepto en el salto de esquí donde solo se encuentran en el fondo del canal y en los tramos de sección circular donde se instalaron 5, para un gran total de 65 puntos de auscultación.

**Imagen 11.** Ubicación de piezómetros en el aliviadero y túnel de descarga

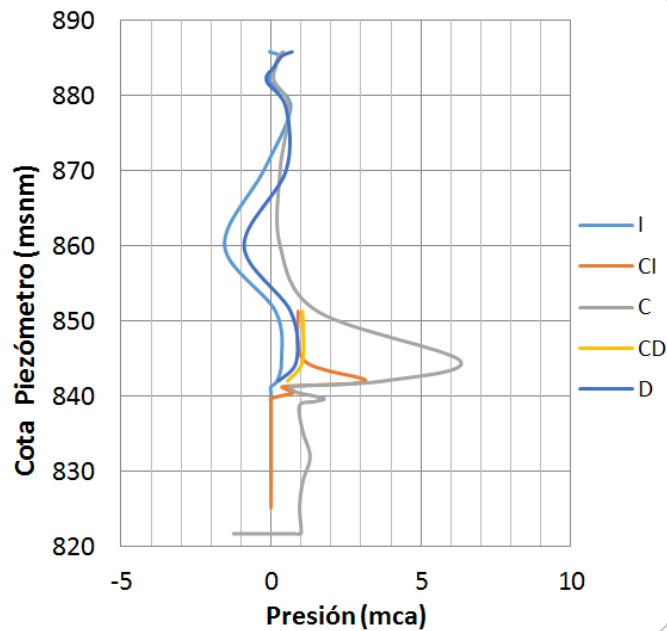


**Imagen 12.** Ubicación de piezómetros a lo largo de la sección Bóveda

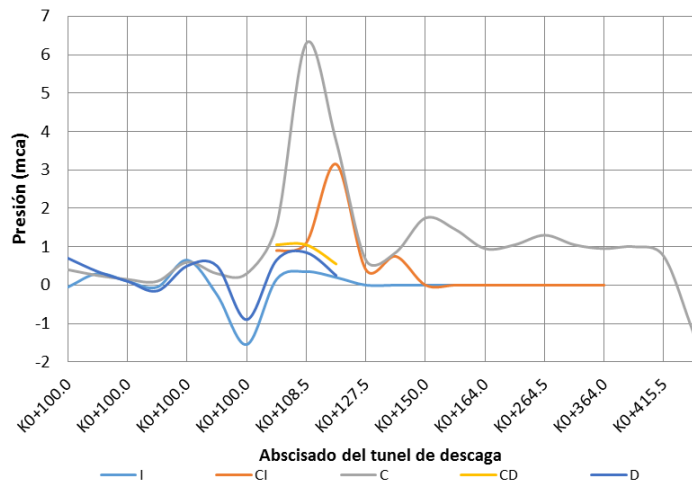


Teniendo presente que el caudal de control será el generado bajo la CMP, para verificar que se evacue en su totalidad el caudal de exceso, se monitoreó la presión piezométrica para diferentes caudales, el primero fue un caudal de 90 m<sup>3</sup>/s, obteniendo valores negativos en el azud de vertedero, pozo y en el salto de esquí. Estos por el cambio brusco de dirección en la caída, en el inicio del codo y la descarga al cuenco amortiguador. En este sentido, es necesario garantizar en el pozo y en el salto de esquí, la forma de airear el flujo antes de la llegada al túnel de descarga y al cuenco amortiguador. En gran número de casos la aireación natural de estas estructuras de aliviaderos con túneles parcialmente llenos es insuficiente para prevenir daños por cavitación, siendo necesario recurrir a aireación natural. (Falvery 1990)

**Imagen 13.** Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para Q=90 m<sup>3</sup>/s (Prototipo)



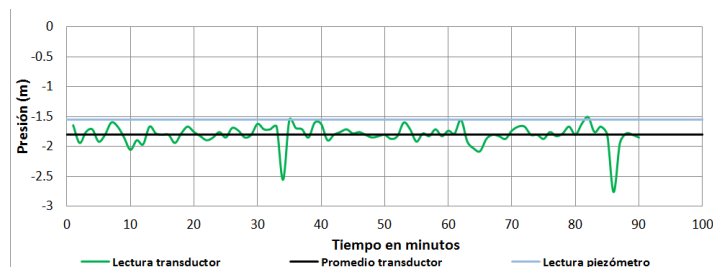
**Imagen 14.** Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un  $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



En las Imágenes 13 y 14 también se evidencian incrementos sustanciales de la presión en la cota 844,75 msnm, ubicada en la abscisa K0+108.5, correspondiente al radio interno del codo, donde se genera un flujo curvilíneo cóncavo debido a la geometría del canal, donde la fuerza centrífuga aumenta la altura piezométrica hasta valores de 6,3 mca para un caudal de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Habiendo determinado la localización del punto de menor presión, GI (-1,55 mca prototipo) situada en el inicio del codo (Cota 860 msnm), se genera un análisis del punto a lo largo del tiempo, observando el comportamiento de la presión.

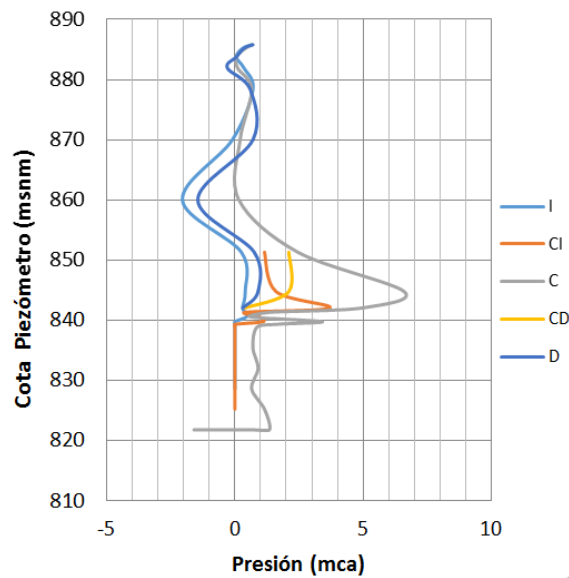
**Imagen 15.** Monitoreo con el transductor de presión en el piezómetro GI para un  $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



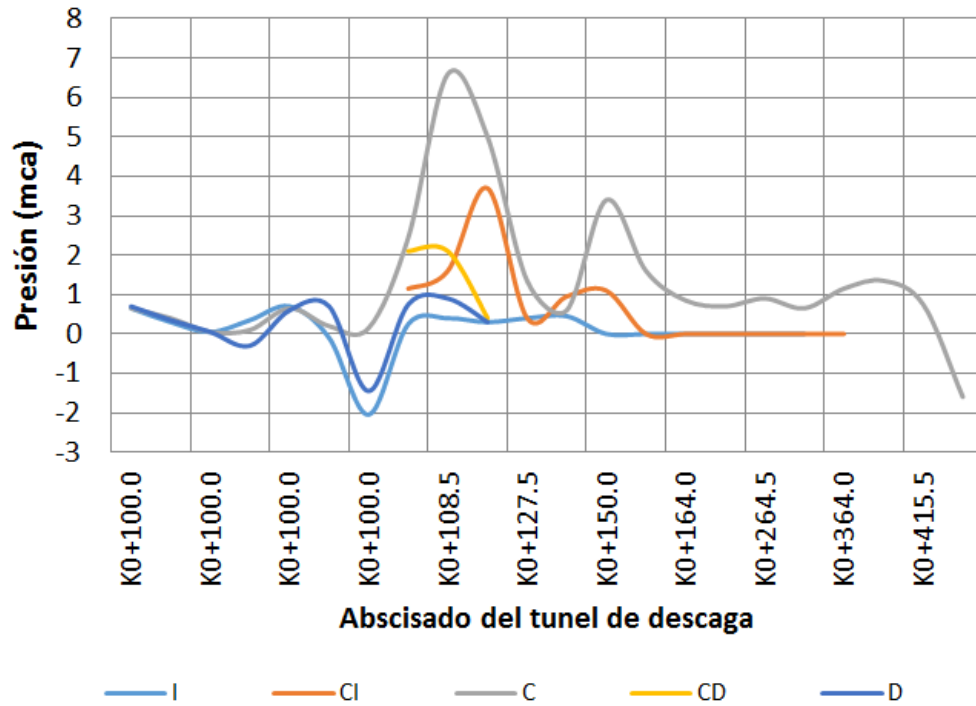
En el anexo B, se registran los datos de las presión piezométricas para un caudal de  $145 \text{ m}^3/\text{s}$ , (Prototipo), donde las presiones negativas en el azud del aliviadero desaparecieron, no obstante, se incrementaron al inicio del codo, esto debido a que se continua observando el desprendimiento de la lámina de flujo en el costado izquierdo por la discontinuidad que genera la transición entre el pozo y el codo (abscisa  $Ko+100$  y cota  $860 \text{ msnm}$ ), a su vez se incrementa la sub presión en el salto de esquí hasta un valor de  $-1,6 \text{ mca}$ . Imagen 16 y 17.

También se observa incrementos en la presión en el eje central del codo (Piezómetro IC) ubicado en la abscisa de  $Ko +108.5$  y correspondiente a la cota  $844,75$  con un valor de  $6,6 \text{ mca}$ .

**Imagen 16.** Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para  $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



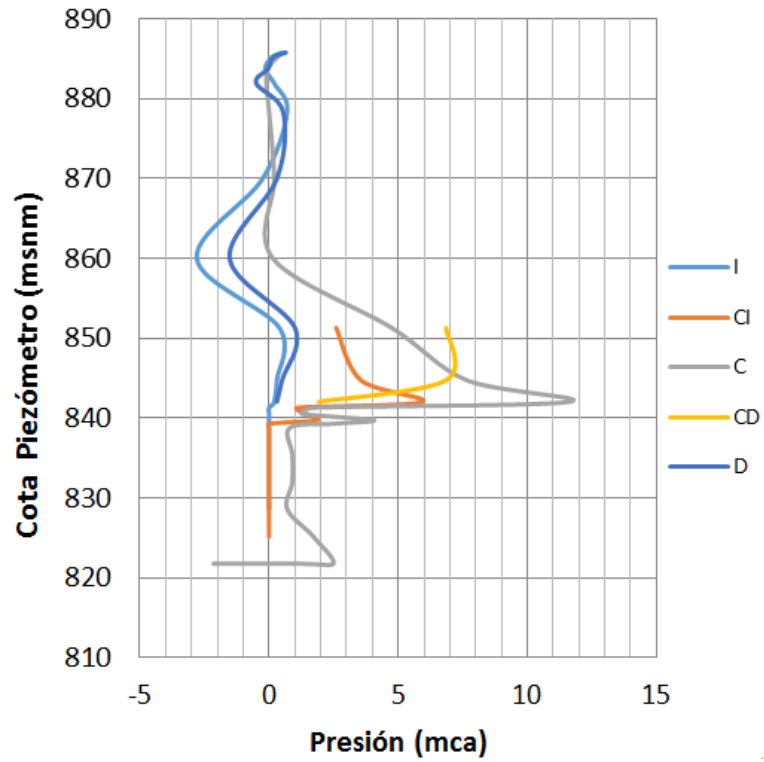
**Imagen 17.** Presiones en túnel de descarga para un  $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



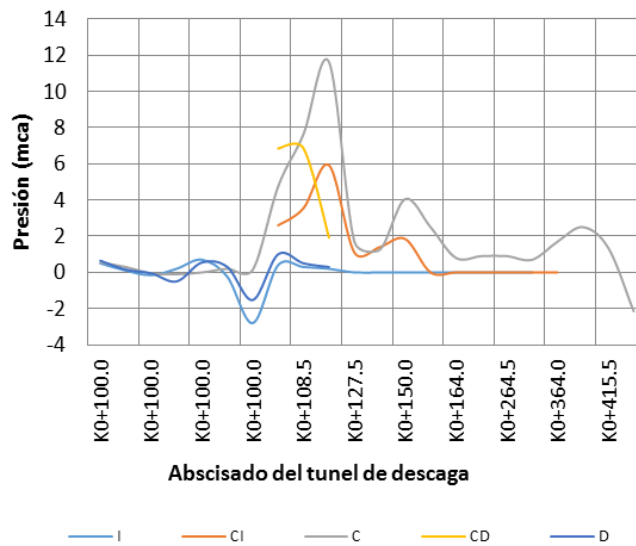
Esta tendencia también se presenta para un caudal de  $270 \text{ m}^3/\text{s}$ , pero a diferencia de la simulación anterior el desprendimiento de la lámina en el pozo asciende hasta la cota 883,75 msnm; y esto se ve reflejado en las presiones negativas registradas en este eje. Anexo C, Imagen 18 y 19.

A lo largo de los ensayos, continúa el aumento en la presión en el eje central (Piezómetro IC) y externo (Piezómetro JC) del Codo, en los puntos ubicados en la abscisa del Ko +108.5 y correspondiente a la cota 844,75 msnm con un valor de 6,6 mca y en la abscisa Ko +116,5 a la cota 842,05 msnm con un valor de 11,63 mca. A su vez se incrementa la sub presión en el salto de esquí hasta un valor de -2.15 mca.

**Imagen 18.** Presiones en el aliviadero y túnel de descarga  $Q=270 \text{ m}^3/\text{s}$



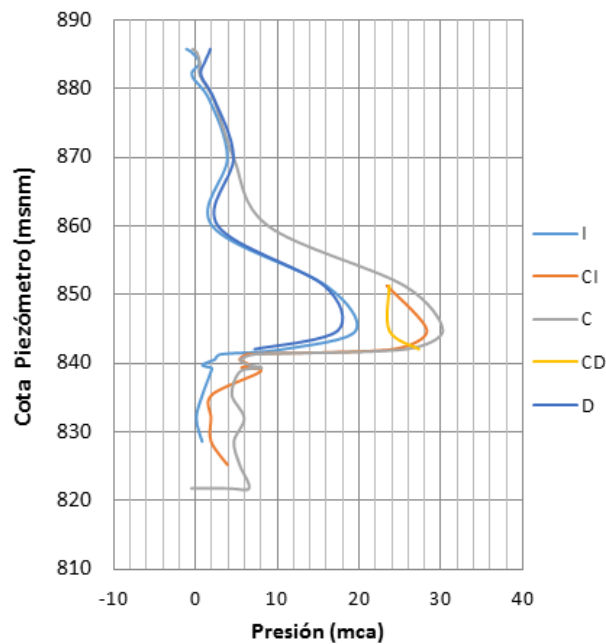
**Imagen 19.** Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un  $Q=270 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



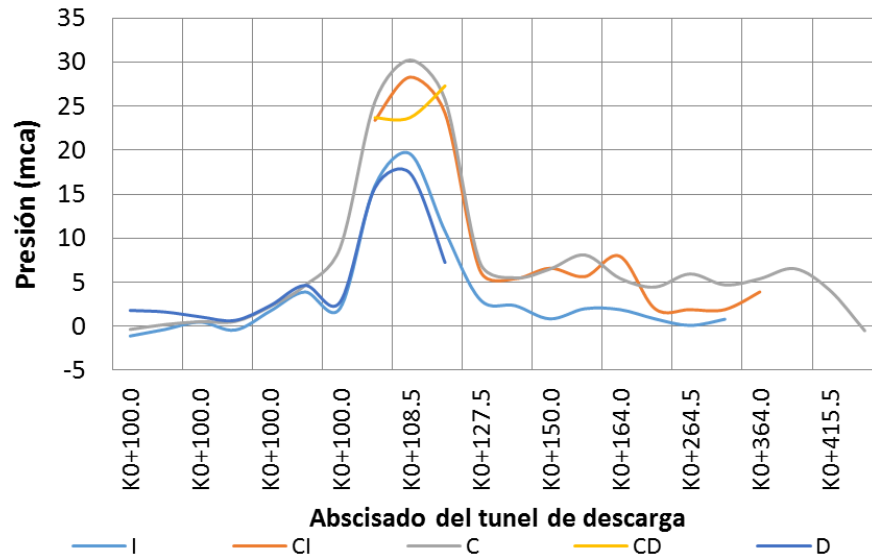
De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación del caudal correspondiente a la CMP, se estima como la hidráulica del aliviadero, de pozo y codo cambian por completo, puesto que pasan a trabajar a presión, por ende, desaparecen entonces las presiones negativas en las inmediaciones del codo y pozo, no obstante, aparecen presiones negativas en el azud y esto se debe al cambio de régimen y por la irregularidad del flujo al evacuar o succionar el aire que almacenaba en el aliviadero pozo y codo.

Para esta condición de carga ( $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$ ) la presión piezométrica en el codo y pozo está gobernada por la cota de la lámina de agua sobre el azud que conforma el vertedero, por ello se observa incrementos de presión piezométrica hasta 30.23 mca en el piezómetro IC. (Anexo D). En el salto de esquí continúan presentándose subpresiones de -0.5 mca.

**Imagen 20.** Presiones en el aliviadero y túnel de descarga en función de la cota para  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



**Imagen 21.** Presiones en túnel de descarga en función de su abscisado para un  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$  (Prototipo)



### 3.1.3 VELOCIDAD DE ENTRADA DE AIRE AL AIREADOR

Se midió con el anemómetro de hilo caliente la velocidad del aire succionada por el túnel de descarga, localizado en la parte superior de la torre de aireación.

**Foto 15.** Anemómetro de hilo caliente localizado sobre la torre de aireación.



El monitoreo se realizó para tres caudales durante una hora obteniéndose los siguientes valores de la velocidad del aire a la entrada de la torre, de esta manera, se observó que las velocidades aumentan conforme aumenta el caudal presente

en el embalse e igualmente en el vertedero de excesos. No obstante, se registraron velocidades inferiores a las establecidas en el diseño.

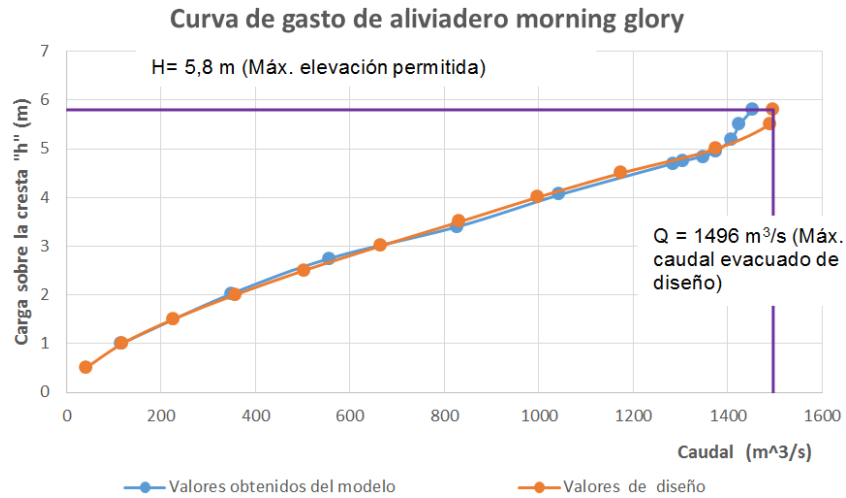
**Tabla 5.** Velocidad de aire medida respecto al caudal de avenida (en base al prototipo).

<b>Caudal de avenida <math>\frac{m^3}{s}</math></b>	<b>V. Mínima del Aire m/s</b>	<b>V. Promedio del Aire m/s</b>	<b>V. Máxima del Aire m/s</b>
117	1	6	8.5
353	12.5	16	19.1
CPM 1460	24	27	32

### 3.1.4 CURVA DE CALIBRACIÓN

Para determinar la capacidad hidráulica real del vertedero, se procede a efectuar la calibración del mismo, realizando varias pruebas, registrando en ellas los valores de 12 caudales, presentes en el embalse, con la dimensión de su respectiva energía disponible (H) sobre el Vertedero Morning Glory, esta, a un distancia del labio fijo, superior a  $5 \cdot h$ , donde h corresponde a la altura alcanzada por el agua. Generando con dichos datos la curva de gasto del aliviadero que progresivamente se compara con la curva de diseño (Imagen 3).

**Imagen 22.** Curva de gasto del vertedero



De la imagen 22, se puede observar que el comportamiento de la calibración del vertedero para caudales pequeños se asemeja a la curva de diseño, no obstante, a medida que el caudal aumenta en el modelo, este es relativamente mayor al teórico, con lo cual se genera una reducción de la capacidad hidráulica del aliviadero de diseño, ya que se evidencian aumentos elevados en la altura del embalse y una reducción significativa en el aumento de caudal, lo cual genera que el control hidráulico del aliviadero, tenga una transición de control en la coronación a una condición de control en el orificio.

### 3.1.5 TRAYECTORIA DEL CHORRO AL SALIR POR EL DEFLECTOR (ANEXO E)

Se determinó el avance del flujo para varias crecientes, como en las estructuras ya mencionadas:

**Caudal de 90 m<sup>3</sup>/s (Prototipo):** Para esta condición el lanzamiento del chorro impacta sobre la abscisa en el Ko + 460, tal como se esperaba de lo calculado con las ecuaciones del movimiento parabólico; La longitud del alcance del lanzamiento

es de 44,0 m. En este caso, el impacto del chorro afecta las paredes del cuenco, generando problemas futuros de erosión.

**Caudal de 145 m<sup>3</sup>/s (Prototipo):** Para esta condición el lanzamiento del chorro impacta sobre la abscisa ubicada en el Ko + 465. La longitud del alcance del lanzamiento es de 49,0 m. Por otra parte no se presenta impacto sobre las paredes del cuenco.

**Caudal de 270 m<sup>3</sup>/s (Prototipo):** Para éste, el lanzamiento del chorro impacta sobre la abscisa ubicada en el Ko + 480. La longitud del alcance del lanzamiento es de 64,0 m. En este caso la energía es disipada en el cuenco de erosión, según lo estipulado en el diseño.

**Caudal de 1460 m<sup>3</sup>/s (Prototipo):** Para esta condición el lanzamiento del chorro impacta sobre la abscisa ubicada en el Ko + 520 y se esperaba que el flujo impactara en la abscisa ubicada en el K0+505. La longitud del alcance del lanzamiento en el modelo reducido es de 103 m y la esperada era de 88 m, esta situación corresponde a que las pérdidas de energía asociadas a la dispersión del chorro en el aire son menores a las consideradas en el diseño, por lo tanto se debe ampliar la longitud del cuenco en 30 m con la finalidad que el chorro impacte a la mitad del mismo.

### 3.2 RESULTADOS DE OPERACIÓN ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN

Se analizó el comportamiento de las tres tomas trabajando independientemente según lo diseñado, para esto se reguló la válvula aguas abajo de la captación con la finalidad de simular el caudal demandado para las plantas de tratamiento y la condición descarga de fondo, con la propósito de analizar cualitativamente el comportamiento del flujo en las inmediaciones de las compuertas para la condición

de carga mínima, ya que esta sería la condición más crítica para generar vórtices o succión de aire que limite la capacidad hidráulica de la conducción o la succión materiales flotantes que terminen obstruyendo las rejillas.

**Tabla 6.** Caudales máximos de diseño de la captación

Toma	Cota Compuerta	Cota mínima de Operación	Q Diseño	Qdiseño Descarga
N°	msnm	msnm	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
1	836.51	841	3.2	11
2	851.46	855.95	3.2	-
3	866.41	870.9	3.2	-

### 3.2.1 COMPORTAMIENTO TOMAS 1, 2 Y 3 CON CAUDAL DE 3,2 m<sup>3</sup>/s (ANEXO F)

El comportamiento del flujo a la entrada de cada una de la tomas selectivas que conforma el sistema de aducción para el caudal máximo de abastecimiento, es tranquilo sin sobresaltos ya que la tinta trazadora se dispensaba en el flujo siendo esta condición típica de flujo con velocidades bajas. La línea de corriente en las tomas se observa de manera paralela a la superficie del agua, captando 3.2 m<sup>3</sup>/s (prototipo).

Por lo tanto se puede concluir que no se evidenció en ninguno de los casos analizados la formación de vórtices o la succión de aire ni de partículas que limiten la capacidad de la captación.

### **3.2.2 COMPORTAMIENTO TOMA N°1 CON CAUDAL DE 11 m<sup>3</sup>/s (ANEXO G)**

La toma No 1, tendrá la función de operar como desagüe de fondo, por lo tanto esta debe tener la capacidad de trabajar sin ocasionar perturbaciones al flujo en las proximidades de la estructura, por lo anterior se analizó esta condición con un caudal de 11 m<sup>3</sup>/s, (Prototipo) obteniendo en el modelo reducido que las líneas de corriente a la altura de la entrada de la toma son paralelas a la superficie del agua, y además no se observan vórtices ni alteraciones en la superficie del agua ni succión de partículas que se ubicaron sobre la superficie libre del embalse en las proximidades de la estructura de toma.

#### 4. CONCLUSIONES

Se cumple a cabalidad con los objetivos propuestos en el plan de proyecto, analizando con ello los comportamientos de las estructuras hidráulicas, sometidas a la CMP, obteniendo así verificación de las características hidráulicas de las estructuras.

Los modelos hidráulicos físicos, en la actualidad son una herramienta eficaz a la hora de evaluar las condiciones de un determinado proyecto, haciendo posible la visualización de los escenarios presentes generados por los fenómenos reales del prototipo, como son crecientes máximas generadas por una determinada intensidad de lluvia sobre la cuenca. Con ello se hace posible la manifestación de efectos inesperados; al realizar el estudio del modelo hidráulico Embalse de Bucaramanga, Rio Tona, se observó cómo se reduce la capacidad hidráulica del vertedero, puesto que se pronostica que su transporte sea inferior al caudal establecido bajo la condición del hidrograma de la creciente máxima (1460 m<sup>3</sup>/s), sin embargo, se debe resaltar que el prototipo y en general el vertedero fue proyectado para una captación de exceso de 1500 m<sup>3</sup>/s. No obstante, esta condición podría llegar a incidir en la seguridad de la presa, al momento de presentarse un sobrevertido de la fuente, superior a un caudal de 1452 m<sup>3</sup>/s; para contrarrestar esta situación, se podría generar mayor altura de control en la presa (Superior a la cota 891.60 msnm) o la ampliación del diámetro del vertedero.

En el aliviadero, se presentaron velocidades inferiores a 2 m/s, con lo cual no se exceden las velocidades de diseño, establecidas en el prototipo, igualmente no se observaron perturbaciones que afecten el buen funcionamiento de la capacidad del vertedero.

En el sistema de aireación las velocidades de admisión del aire que se registraron fueron bajas respecto a las usadas en las diferentes metodologías del diseño.

El sistema de bocatomas de captación, se comportan de manera adecuada, captando el caudal de aducción respectivo al diseño, no se observan movimientos de la superficie del agua en las inmediaciones de cada una de las tomas (Inferior, intermedia y de fondo) para las condiciones establecidas de caudal y de cota mínima de operación, situación similar cuando la toma No 1, trabaja como desagüe de fondo.

La presencia de presiones negativas a lo largo del canal de excesos, podría llevar a la erosión del mismo en los puntos donde se presenta esta condición, por el fenómeno de cavitación, por lo cual sería necesario analizar formas de aireación en estos sectores, garantizando el buen funcionamiento y durabilidad el canal. Por otra parte, este fenómeno de cavitación, también podría ser generado por las variaciones de velocidad presentes en el canal de excesos, haciéndose necesario el reforzamiento del tramo involucrado.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DANE [2005], Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010 - 2030. Universidad Industrial de Santander y municipio de Bucaramanga. Bucaramanga, 2011.
- [2] Reseña Histórica Del Laboratorio De Hidráulica En La Facultad De Minas, Breve Historia De La Hidráulica Y Los Modelos Reducidos En El Mundo. [http://www.medellin.unal.edu.co/~egeoma/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=12](http://www.medellin.unal.edu.co/~egeoma/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=12) [citado el 20 de junio de 2014]
- [3] F. M. White, Mecánica de Fluidos, Sexta Edición, McGraw-Hill, México, 2008, Análisis dimensional y semejanza, Flujo en canales abiertos. p 287 a 327 y 693 a 731.
- [4]Capitulo 2 Modelación Hidráulica. [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1\\_123\\_183\\_81\\_1150.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf) [citado el 22 de Mayo de 2014].
- [5] Gómez Giraldo A. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga, Memorando Técnico número 11. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia 2012.
- [6]Salas, José &Gavilán, Germán. Revisión de los Caudales de Diseño para la Represa de Bucaramanga (Río Tona) – Informe No 1 y 2. 2011
- [7] Gavilán, German. Guía De Laboratorio De Hidráulica De Canales Abiertos. Calibración De Vertederos. P 79 a 89. 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA. Agua Viva. Embalse de Bucaramanga, Descripción del proyecto y Justificación. [En línea] [Consultado el 10 de enero de 2013] Disponible en Internet: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=39>

CHOW, V.T. Hidráulica de Canales Abiertos, Bogotá: Mc Graw Hill. 1994

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS. Guía Técnica de Seguridad de Presas, Avenida del Proyecto. 1997.

INTEGRAL S.A. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga, Memorias de cálculo, Vertedero. Colombia 2011.

PARDO GONZALEZ, Jhonan; ALVAREZ PRADA, Carlos Fernando y VILLARREAL GALVIS, Néstor Ariel. Práctica Empresarial Para El Monitoreo Y Control Del Modelo Físico Del Embalse Bucaramanga, Proyecto De Regulación Rio Tona. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2013.

RESTREPO MEJIA, Jorge I. Reseña histórica del laboratorio de hidráulica en la facultad de minas : Breve historia de la hidráulica y los modelos reducidos en el mundo.[en línea]. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. [Medellín. Colombia] UNAL/MEDELLIN, 2014 [Citado 14 Junio 2014] Disponible en Internet: [http://www.medellin.unal.edu.co/~egeoma/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12&Itemid=12](http://www.medellin.unal.edu.co/~egeoma/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=12)



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER /ALCALDIA DE BUCARAMANGA.  
Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010 - 2030. Bucaramanga:  
UIS/Alcaldía de Bucaramanga, 2009

## **ANEXOS**

**ANEXO A**

**PRESIONES EN EL TÚNEL DE DESCARGA PARA UN CAUDAL DE 90 M<sup>3</sup>/S  
(PROTOTIPO)**



**PRESIONES PUNTOS PIEZÓMETRICOS PROTOTIPO**

	Abscisa	Cota (msnm)	Piezómetro No.	I	CI	C	CD	D
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Azud y Pozo	K0+100.0	885.80	<b>A</b>	-0.050		0.400		0.700
	K0+100.0	885.20	<b>B</b>	0.300		0.250		0.350
	K0+100.0	883.75	<b>C</b>	0.100		0.150		0.100
	K0+100.0	881.94	<b>D</b>	-0.050		0.100		-0.150
	K0+100.0	878.32	<b>E</b>	0.650		0.600		0.500
	K0+100.0	870.00	<b>F</b>	-0.250		0.300		0.500
	K0+100.0	860.00	<b>G</b>	-1.550		0.300		-0.900
Codo	K0+102.0	851.30	<b>H</b>	0.150	0.900	1.550	1.050	0.650
	K0+108.5	844.75	<b>I</b>	0.350	1.100	6.300	1.050	0.850
	K0+116.5	842.05	<b>J</b>	0.200	3.150	3.750	0.550	0.250
circular	K0+127.5	841.30	<b>K</b>	0.000	0.400	0.650		
	K0+138.5	840.55	<b>L</b>	0.000	0.750	0.850		
Transición	K0+150.0	839.75	<b>M</b>	0.000	0.000	1.750		
	K0+157.0	839.30	<b>N</b>	0.000	0.000	1.450		
	K0+164.0	838.80	<b>O</b>	0.000	0.000	0.950		
puerto	K0+214.5	835.40	<b>P</b>	0.000	0.000	1.050		



	K0+264.5	832.00	<b>Q</b>	0.000	0.000	1.300		
	K0+314.5	828.60	<b>R</b>	0.000	0.000	1.050		
	K0+364.0	825.20	<b>S</b>		0.000	0.950		
<b>Deflector</b>	K0+414.0	821.80	<b>T</b>			1.000		
	K0+415.5	821.75	<b>U</b>			0.750		
	K0+416.5	821.75	<b>V</b>			-1.250		



**ANEXO B**

**PRESIONES EN EL TÚNEL DE DESCARGA PARA UN CAUDAL DE 145 M<sup>3</sup>/S  
(PROTOTIPO)**



**PRESIONES PUNTOS PIEZÓMETRICOS PROTOTIPO**

	Abscisa	Cota (msnm)	Piezómetro No.	I	CI	C	CD	D
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Azud y Pozo	K0+100.0	885,80	<b>A</b>	0,650		0,650		0,700
	K0+100.0	885,20	<b>B</b>	0,300		0,400		0,350
	K0+100.0	883,75	<b>C</b>	0,050		0,050		0,050
	K0+100.0	881,94	<b>D</b>	0,350		0,100		-0,300
	K0+100.0	878,32	<b>E</b>	0,700		0,650		0,600
	K0+100.0	870,00	<b>F</b>	-0,100		0,200		0,700
	K0+100.0	860,00	<b>G</b>	-2,050		0,150		-1,450
	Codo	K0+102.0	851,30	<b>H</b>	0,250	1,150	2,450	2,100
K0+108.5		844,75	<b>I</b>	0,400	1,600	6,600	2,100	0,900
K0+116.5		842,05	<b>J</b>	0,300	3,700	5,000	0,400	0,300
circular	K0+127.5	841,30	<b>K</b>	0,400	0,400	1,350		
	K0+138.5	840,55	<b>L</b>	0,450	0,950	0,600		
Transición	K0+150.0	839,75	<b>M</b>	0,000	1,100	3,400		
	K0+157.0	839,30	<b>N</b>	0,000	0,000	1,600		
	K0+164.0	838,80	<b>O</b>	0,000	0,000	0,850		
boveda	K0+214.5	835,40	<b>P</b>	0,000	0,000	0,700		



	K0+264.5	832,00	<b>Q</b>	0,000	0,000	0,900		
	K0+314.5	828,60	<b>R</b>	0,000	0,000	0,650		
	K0+364.0	825,20	<b>S</b>		0,000	1,150		
<b>Deflector</b>	K0+414.0	821,80	<b>T</b>			1,350		
	K0+415.5	821,75	<b>U</b>			0,750		
	K0+416.5	821,75	<b>V</b>			-1,600		

**ANEXO C**

**PRESIONES EN EL TÚNEL DE DESCARGA PARA UN CAUDAL DE 270 M<sup>3</sup>/S**

**(PROTOTIPO)**



<b>PRESIONES PUNTOS PIEZÓMETRICOS PROTOTIPO</b>								
	Abscisa	Cota (msnm)	Piezómetro No.	I	CI	C	CD	D
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
<b>Azud y Pozo</b>	K0+100.0	885,80	<b>A</b>	0,500		0,550		0,650
	K0+100.0	885,20	<b>B</b>	0,100		0,300		0,150
	K0+100.0	883,75	<b>C</b>	-0,150		-0,050		-0,050
	K0+100.0	881,94	<b>D</b>	0,200		-0,100		-0,500
	K0+100.0	878,32	<b>E</b>	0,700		0,000		0,550
	K0+100.0	870,00	<b>F</b>	-0,250		0,200		0,300
	K0+100.0	860,00	<b>G</b>	-2,800		0,150		-1,525
<b>Codo</b>	K0+102.0	851,30	<b>H</b>	0,400	2,600	4,750	6,850	1,000
	K0+108.5	844,75	<b>I</b>	0,300	3,550	7,650	6,850	0,500
	K0+116.5	842,05	<b>J</b>	0,200	5,925	11,625	1,925	0,300
<b>circular</b>	K0+127.5	841,30	<b>K</b>	0,000	1,100	1,700		
	K0+138.5	840,55	<b>L</b>	0,000	1,400	1,250		
<b>Transición</b>	K0+150.0	839,75	<b>M</b>	0,000	1,850	4,050		
	K0+157.0	839,30	<b>N</b>	0,000	0,000	2,500		
	K0+164.0	838,80	<b>O</b>	0,000	0,000	0,800		
<b>Boveda</b>	K0+214.5	835,40	<b>P</b>	0,000	0,000	0,900		



	K0+264.5	832,00	<b>Q</b>	0,000	0,000	0,900		
	K0+314.5	828,60	<b>R</b>	0,000	0,000	0,700		
	K0+364.0	825,20	<b>S</b>		0,000	1,700		
<b>Deflector</b>	K0+414.0	821,80	<b>T</b>			2,500		
	K0+415.5	821,75	<b>U</b>			1,350		
	K0+416.5	821,75	<b>V</b>			-2,150		

**ANEXO D**

**PRESIONES EN EL TÚNEL DE DESCARGA PARA UN CAUDAL DE 1460 M<sup>3</sup>/S  
(PROTOTIPO)**



<b>PRESIONES PUNTOS PIEZÓMETRICOS PROTOTIPO</b>								
	<b>Abscisa</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Piezómetro No.</b>	<b>I</b>	<b>CI</b>	<b>C</b>	<b>CD</b>	<b>D</b>
				<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>
<b>Azud y Pozo</b>	K0+100.0	885,80	<b>A</b>	-1,100		-0,350		1,800
	K0+100.0	885,20	<b>B</b>	-0,350		0,200		1,625
	K0+100.0	883,75	<b>C</b>	0,475		0,525		1,075
	K0+100.0	881,94	<b>D</b>	-0,425		0,550		0,675
	K0+100.0	878,32	<b>E</b>	1,725		2,250		2,350
	K0+100.0	870,00	<b>F</b>	3,900		4,650		4,650
	K0+100.0	860,00	<b>G</b>	2,050		8,900		2,750
<b>Codo</b>	K0+102.0	851,30	<b>H</b>	16,000	23,400	25,550	23,700	15,750
	K0+108.5	844,75	<b>I</b>	19,600	28,300	30,250	23,700	17,400
	K0+116.5	842,05	<b>J</b>	10,800	24,200	25,765	27,300	7,250
<b>circular</b>	K0+127.5	841,30	<b>K</b>	3,050	6,350	7,250		
	K0+138.5	840,55	<b>L</b>	2,350	5,400	5,500		
<b>Transición</b>	K0+150.0	839,75	<b>M</b>	0,850	6,600	6,500		
	K0+157.0	839,30	<b>N</b>	2,000	5,650	8,100		
	K0+164.0	838,80	<b>O</b>	1,900	7,950	5,450		

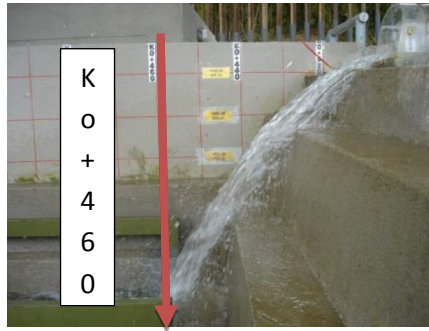


<b>Bóveda</b>	K0+214.5	835,40	<b>P</b>	0,850	2,000	4,450		
	K0+264.5	832,00	<b>Q</b>	0,100	1,900	5,950		
	K0+314.5	828,60	<b>R</b>	0,800	1,900	4,700		
	K0+364.0	825,20	<b>S</b>		3,900	5,400		
<b>Deflector</b>	K0+414.0	821,80	<b>T</b>			6,550		
	K0+415.5	821,75	<b>U</b>			4,100		
	K0+416.5	821,75	<b>V</b>			-0,500		

## **ANEXO E**

### **TRAYECTORIA DE CHORRO AL SALIR DEL DEFLECTOR**

### TRAYECTORIA PARA $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$

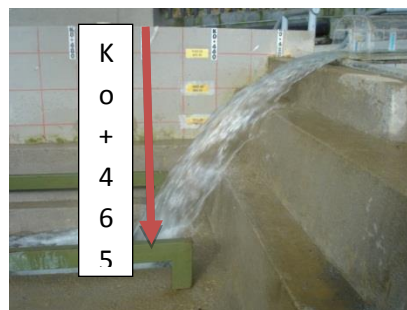


**Foto 1.** Alcance del lanzamiento para un  $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$



**Foto 2.** Afectación a los taludes para un  $Q=90 \text{ m}^3/\text{s}$

### TRAYECTO PARA $Q= 145 \text{ m}^3/\text{s}$



**Foto 3.** Alcance del lanzamiento para un  $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 4. Afectación a los taludes para un  $Q=145 \text{ m}^3/\text{s}$

TRAYECTORIA PARA  $Q= 270 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 5. Alcance del lanzamiento para un  $Q=270 \text{ m}^3$

TRAYECTORIA PARA  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$



**Foto 6.** Alcance del lanzamiento para un  $Q=1460 \text{ m}^3/\text{s}$

**ANEXO F**  
**RESULTADOS DE OPERACIÓN ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN**

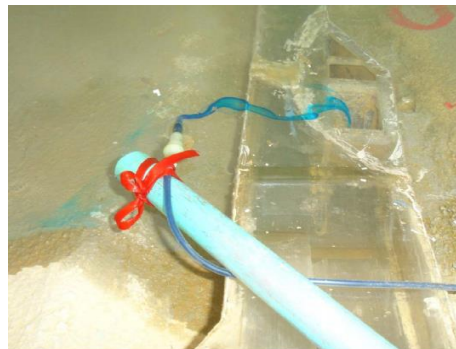
## COMPORTAMIENTO TOMAS 1, 2 Y 3 CON CAUDAL DE 3.2 m<sup>3</sup>/s



**Foto 7.** Líneas de flujo en la toma No1 para un  $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$



**Foto 8.** Nivel mínimo de operación en la toma No 1



**Foto 9.** Líneas de flujo en la toma No 2 para un  $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 10. Nivel mínimo de operación en la toma No 2



Foto 11. Líneas de flujo en la toma No 3 para un  $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 12. Nivel mínimo de operación en la toma No 3

## **ANEXO G**

### **RESULTADOS DE OPERACIÓN ESTRUCTURA DE CAPTACION**

## COMPORTAMIENTO TOMAS 1 CON CAUDAL DE 11 m<sup>3</sup>/S



**Foto 13.** Líneas de flujo en la toma No 1 para un  $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$



**Foto 14.** Partículas en suspensión que no son succionadas por la captación inferior operando como descarga de fondo.

**ANEXO H.**

**GUIA DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

**SIMULACIÓN DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA**

## SIMULACIÓN DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA

### OBJETIVO GENERAL

Estudiar el modelo físico reducido de estructuras hidráulicas (especialmente aliviaderos y obras de desagüe del embalse)

### OBJETIVOS ESPECIFICOS

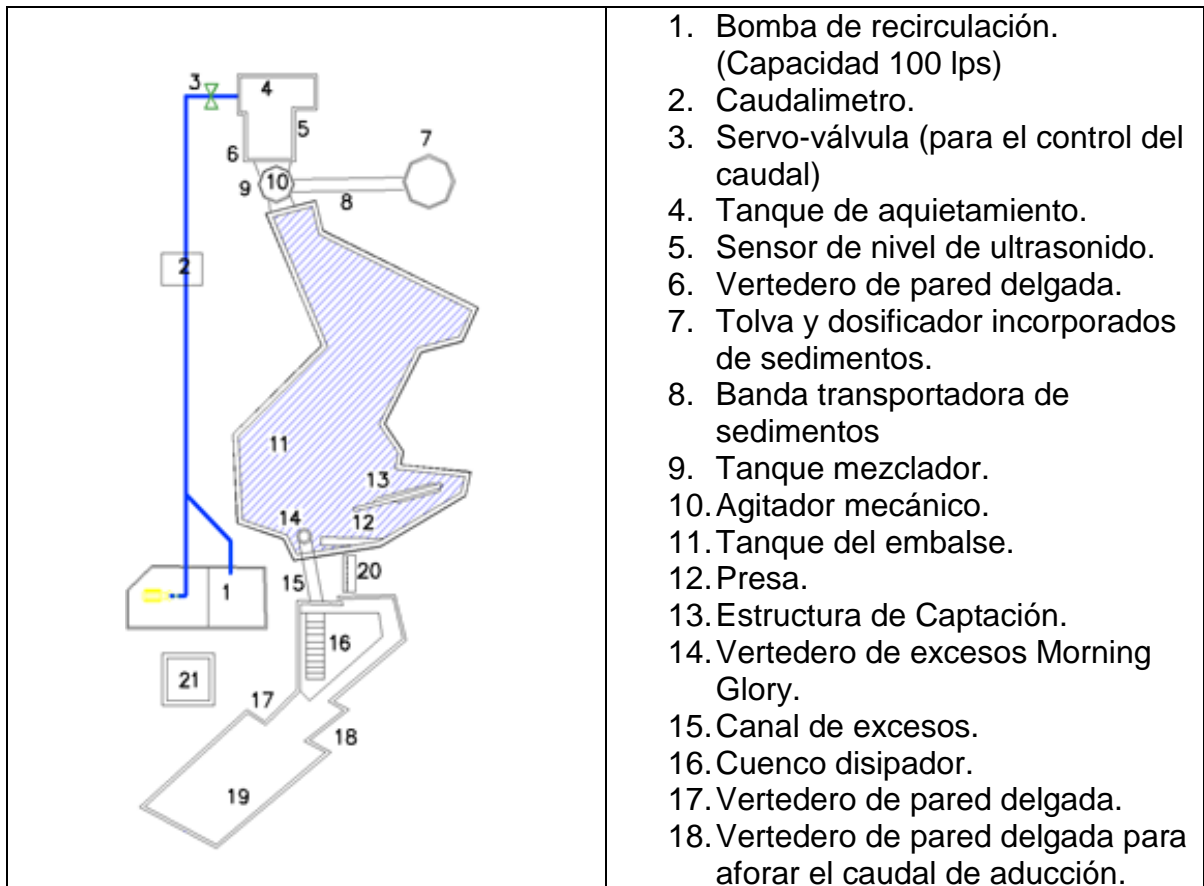
Establecer el comportamiento de las estructuras hidráulicas presentes en el modelo del embalse (captación y vertedero de excesos).

Determinación del caudal de excesos presente en una creciente significativa del cauce.

Calibrar los vertederos presentes en el modelo.

Determinar la velocidad en el canal de excesos.

Determinar la longitud de chorro en el salto de esquí.



	<p>19. Tanques de sedimentos.          20. Piezómetros.          21. Oficina de control.</p>
--	--

**Imagen 23.** Esquema el Modelo Embalse de Bucaramanga

## **EQUIPO**

### **Vertedero de excedencias (Vertedero Morning Glory)**

Este vertedero se encargara de la evacuación total de creciente máxima para la cual fue diseñada el prototipo (1500 m<sup>3</sup>/s), para el modelo un caudal de 95 l/s, ello teniendo en cuenta que no posee compuertas y su descarga es total en el canal de excesos y progresivamente es entregado al cuento de amortiguamiento.

De acuerdo al escalamiento del modelo inicialmente posee un diámetro de 40cm en la cresta (prototipo 20m), y la garganta 18cm (prototipo 9m).

### **Tanque del embalse**

Representa la topografía inundada del embalse, teniendo en sí mismo las obras hidráulicas de captación y vertedero de excesos.

### **Sistema de captación**

La captación se encuentra estructurada por una bocatoma con entradas (3) a diferentes niveles, diseñadas para captar un caudal de 0.181 l/s (prototipo 3,2m<sup>3</sup>/s), en su mínimo nivel<sup>[1]</sup>.

### **Tanque del cuenco amortiguador**

Cuento construido en concreto, con una base de grava a partir de la cual se analiza la entrega desde el canal de excesos.

## **Sistema de bombeo**

El sistema de bombeo cuenta con una capacidad de bombeo de 100 l/s, con una tubería de impulso de 10", con una válvula tipo mariposa, seguida de la bomba y una servo-válvula antes de la entrada al tanque de aquietamiento. Además cuenta, con una válvula de cheque que impide el retorno del flujo a la bomba, evitando posibles daños al sistema de bombeo.

## **Servo válvula eléctrica**

Este instrumento se utiliza para la regulación de los caudales que entran al modelo, con el objetivo de simular el tránsito hidráulico de las hidrógrafas de caudal y se localiza en la tubería de impulsión del modelo hidráulico justo antes del tanque de aquietamiento. La servo-válvula actúa remotamente permitiendo la variación del caudal en el tiempo.

## **Tanque de aquietamiento**

Este tanque tiene el propósito de recibir el caudal bombeado y uniformizar el flujo para ser aforado, consta de un tanque de dos niveles separados por una losa de concreto y el nivel superior está separado por una pantalla de grava de 10cm espesor donde se termina de homogenizar el flujo y al final es aforado por un vertedero de pared delgada.

## **Dosificador volumétrico**

Se encarga de suministrar los sedimentos al embalse simulando la condición real de los mismos, suministrándolos a una tasa de 0.3 y 1.5 ton/h.

## **Banda transportadora para granos y polvos.**

Con el fin de dotar el tanque mezclador de sedimentos de los mismos, se dispuso la banda transportadora, de longitud 3 m.

## **Tanque de mezcla**

En él se realiza la mezcla de sedimento y agua que progresivamente será entregada al embalse durante la simulación.

## **Vertederos de pared delgada**

El modelo hidráulico tiene tres vertederos de pared delgada para aforar los caudales a la entrada y salida del modelo, uno triangular en la salida de la aducción y dos rectangulares, el primero en la entrada al modelo que sirve para el control del caudal por si el caudalímetro digital falla, o se desajusta y el segundo se encuentra en la salida del cuenco amortiguador, midiendo el caudal evacuado por el Morning Glory (figura 19).

La calibración de los vertederos, se realizó con la ecuación 1<sup>[2]</sup>, en función de la altura de la lámina de agua “H”, y de las constantes de calibración “C” y “n”. Las ecuaciones para el cálculo del caudal son:

$$Q = C * H^n \quad (1)$$

## **JUSTIFICACIÓN**

La modelación hidráulica sigue siendo a pesar de los múltiples modelos numéricos que existen en la actualidad, uno de los métodos más efectivos y eficaces, puesto que por medio de ellos es posible realizar una simulación de fenómenos reales presentes en determinadas condiciones de espacio y tiempo. En este sentido, dichos modelamientos son usados hoy por hoy en estudios de propagación de mareas, erosión, sedimentación de cauces, control de avenidas, control de vertederos, entre otros. De esta manera, en esta práctica de laboratorio se observará el comportamiento de las estructuras hidráulicas de una presa a partir de su modelo hidráulico.

## **MARCO TEORICO**

En el área hidráulica al hablar de modelo hidráulico, se hace referencia a un sistema de simulación de condiciones reales a partir de un escalamiento estipulado con anterioridad. De esta manera, es posible prever las condiciones y resultados sobre el prototipo, simulando el fenómeno real y conceptualizándolo, para finalmente describirlo y cuantificarlo. Del mismo modo, son usados para conocer el comportamiento de ciertas estructuras hidráulicas involucradas en el prototipo, como es el caso de la simulación a escala reducida del Embalse de Bucaramanga (modelo físico).

**Tabla 7. Escalas del modelo<sup>1</sup>**

<b>Variables Hidráulicas</b>	<b>Escala (Prototipo:Modelo)</b>
Tiempo	1:7.071
Caudal	1:17677.670
Velocidad	1:7.071
Presión	1:50
Fuerza	1:125000
Cabeza de Presión	1:50
Cabeza de Velocidad	1:50
Caudal Del Río	1.1[m <sup>3</sup> /s]:0.062[l/s]
Captación	3.2[m <sup>3</sup> /s]:0.181[l/s]
Vertedero Q <sub>máx</sub>	1500[m <sup>3</sup> /s]:85[l/s]

## **VERTEDERO DE PARED DELGADA CON CONTRACCIONES<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Gómez Giraldo A. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga, Memorando Técnico número 11.

<sup>2</sup>PRÁCTICA II, II ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS. [http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2\\_vertederos.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2_vertederos.pdf) [citado el 20 de julio de 2014]

En el modelo, se observan dos vertederos rectangulares de pared delgada con contracciones. En el caso de presentar contracciones el valor de la longitud efectiva estará dado por ( $L'$ ):

$$Qt = \frac{2}{3} \sqrt{2g} * Cd * L' * h^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$L' = L - n(0.1n) \quad (13)$$

Donde, n es el número de contracciones laterales.



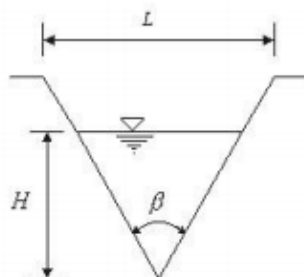
**Imagen 24.** Vertedero rectangular con contracción.  $n=2$

### VERTEDERO TRIANGULAR

Este tipo de vertedero se emplea con frecuencia para medir caudales pequeños (inferiores aproximadamente a 6 l/s). El ángulo  $\theta$  puede tomar cualquier valor, aunque es muy frecuente el vertedero con  $\theta = 90^\circ$ .

**Tabla 8. Valores Característicos de Cd**

Ángulo $\beta$	Cd
15°	0.52-0.75
30°	0.59-0.72
45°	0.59-0.69
60°	0.50-0.54
90°	0.50-0.60



**Imagen 25.** Esquema de vertedero triangular.

**Fuente:** [http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2\\_vertederos.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2_vertederos.pdf)

Igualmente puede determinarse la expresión que relaciona el caudal y la profundidad de flujo sobre la cresta de un vertedero triangular de pared delgada. Este tipo de vertederos se emplean también para la medición de caudales, obteniéndose una mejor precisión debido a que presentan mayor carga para un mismo caudal. Sin embargo por esta misma razón, se limita a la medición de caudales pequeños.

$$Qt = \frac{8}{15} Cd \sqrt{2g} \text{tang} \left( \frac{\beta}{2} \right) h^{\frac{5}{2}} \quad (14)$$

Igualmente, se determina el coeficiente  $Cd$  para hallar el QR, tal como se especificó en la ecuación

$$Cd = \frac{Qr}{Qt} \quad (15)$$

### ECUACION DE MANNING<sup>3</sup>

En 1889 el Ingeniero Irlandés Robert Manning presento una ecuación para determinar el valor de “C”, en función del radio hidráulico y la rugosidad del

<sup>3</sup>Chow, V.T. Hidráulica de Canales Abiertos, Ed. Mc Graw Hill. 1994

material del cual está construido el canal. Esta ecuación es el resultado del proceso de ajuste de curvas, por tanto es completamente empírica.

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

$$V = \frac{1}{n} (R)^{\frac{2}{3}} (S)^{\frac{1}{2}} \quad o \quad Q = \frac{A}{n} (R)^{\frac{2}{3}} (S)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

- Donde,
- V = Velocidad media del Flujo.
  - n = Coeficiente de Rugosidad del Material
  - R = Radio Hidráulico De La Sección Mojada
  - S= Pendiente

### **SALTO DE SKI**

Es una de las formas más usuales al momento de disipar energía cinética en una estructura hidráulica, por medio de una solera curvada, es aplicable a la entrega sobre cauces como es el caso del modelo del embalse.



**Imagen 26. Salto de Esquí presente en el modelo**

La trayectoria del chorro de descarga puede ser calculada por medio de:

$$y = x \tan \alpha - \frac{x^2}{3.6 (d + hv) \cos^2 \alpha} \quad (17)$$

Donde,

$xy$  = son coordenadas de un sistema cartesiano con origen en el salto de esquí

$\alpha$  = Ángulo formado en el salto

$v$  = Velocidad de Salida

$d$  = tirante de salida

El salto de esquí del modelo tiene un ángulo de lanzamiento de cero grados con la horizontal y lanzará el chorro hacia un cuenco de erosión excavado a nivel del lecho del río, el deflector quedo localizado a más de 20 m por encima del nivel máximo del río durante el paso de la Creciente Máxima Probable. Las respectivas cotas de elevación de la solera en la salida del deflector y la elevación en la solera del cuenco de erosión son respectivamente 817.3 m.s.n.m y 765 m.s.n.m.

### **Parte I: Calibración de los Vertederos de Pared Delgada**

## PROCEDIMIENTO

1. Identificar las estructuras hidráulicas presentes en el modelo.
2. Mida las dimensiones del vertedero instalado y el ángulo para el triangular.
3. Encender el sistema de bombeo.
4. Abrir la válvula de compuerta que regula el caudal en el embalse y esperar que se estabilice.
5. Una vez estabilizado el flujo, tome el valor del caudal presente
6. Tome los datos necesarios en las tablas 3, 4 y 5.
7. Realizar la calibración del vertedero triangular.

## DATOS Y CÁLCULOS

**Tabla 9. Datos lámina de agua en el vertedero rectangular**

DATOS	Q Real [m <sup>3</sup> /s]	H [cm] Vertedero Rectangular
1		
2		
3		
4		
5		

**Tabla 10. Datos de lámina de agua en el vertedero Triangular**

DATOS	Q Real [m <sup>3</sup> /s]	H [cm] Vertedero Triangular
1		
2		
3		
4		
5		

**Tabla 11. Datos lamina de agua en el Vertedero Morning Glory**

DATOS	Q Real [m3/s]	H [cm] Vertedero Triangular
1		
2		
3		
4		
5		

1. Formule la ecuación de calibración de cada uno de los vertederos a partir de  $Q = C * H^n$ , para tal caso se requiere linealizar los valores tomados en el modelo, tomando con ello los logaritmos de cada uno de los datos, luego de ello, grafique la función correspondiente. Realizando la respectiva regresión

**Tabla 12. Formato de Regresión**

TOM A	Q real m3/s	H Vertedero [cm]	ln H	ln Q	lnQ * ln H	ln H <sup>2</sup>	Q exp	%Error r

$$Q_{exp} = C * H^n$$

$$\ln Q = \ln (C * H^n)$$

$$\ln Q = \ln C + n * \ln H$$

Graficando Ln Q vs Ln H se realiza una regresión lineal teniendo como resultado

$$Y = bx + a, \text{ donde } Y = \ln Q, b = n, a = \ln C \text{ y } x = \ln H$$

También se puede usar las expresiones

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

2. A partir de los datos de la tabla, grafique los valores de Qreal, respecto a H. y compárelos con la función de calibración.
3. Considerando la expresión hallada de la forma  $Q = C * H^n$  para el vertedero analizado, calcule el caudal experimental, Q experimental.
4. Calcule el coeficiente Cd, para cada uno de los caudales ensayados y compárelos con los reportados por otros investigadores en la literatura.
5. Calcule el caudal Qt sobre el vertedero mediante las ecuaciones respectivas del tipo de vertedero (ecuaciones 12 y 14)

## Parte II: Determinación de la velocidad en el canal de excesos

Teniendo en cuenta que el canal de excesos presenta tres secciones diferentes a lo largo del mismo, inicialmente una sección circular de diámetro 18 cm, una transición entre la sección circular y la tipo baúl de 30 cm de largo y finalmente un tramo de sección baúl de diámetro 18 cm de longitud 5.04 m. se procede a determinar la velocidad en el mismo, a partir del caudal captado en el Vertedero. Y el tirante a lo largo de diferentes abscisas del canal.

### PROCEDIMIENTO

1. Encienda el sistema de bombeo, cuando el flujo se estabilice, determine el caudal.
2. Determine los puntos a lo largo de los cuales se determinara la velocidad.
3. Mida el tirante en los puntos seleccionados y regístrelos en la tabla 6.

### DATOS Y CALCULOS

Tabla 13. Toma de Datos de Tirante

Abscisa	$\Delta H$ Perfil [cm]
---------	------------------------


**NOTA:** La base del canal, será igual al diámetro del mismo, en este caso 18 cm.

1. Determine la velocidad a lo largo del canal, por medio de  $Q=VA$ .
2. Determine la velocidad promedio del flujo.

**Tabla 14. Velocidad del Canal de Excesos**

Abscisa	$\Delta H$ Perfil [cm]	Velocidad (m/s)

**Parte III: Determinación de la Velocidad de Aproximación Al Vertedero de Excesos**

**PROCEDIMIENTO**

1. Encienda el bombeo.
2. Localice el vertedero de excesos Morning Glory.
3. Tome distancias referentes y con ayuda de confeti, determine el tiempo que dura la partícula en recorrerla. Anote sus datos en la tabla 7.
4. Por medio de la ecuación  $V = \frac{x}{t}$ , se determinara la velocidad de aproximación a la cresta del Vertedero.

## DATOS Y CALCULOS

**Tabla 15. Toma de Datos de Velocidad**

<b>Distancia[x] (m)</b>	<b>Tiempo De Recorrido [t] (seg)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>

**Velocidad promedio de Aproximación:** \_\_\_\_\_

### Parte IV: Ecuación de Manning

Haciendo uso de la ecuación (16) conocida como la ecuación de manning y a partir de las variables hidráulicas del canal de excesos, se procederá a determinar el tirante en zonas determinadas del mismo, comparándolas con el tirante real, presente en el modelo.

### PROCEDIMIENTO

1. Encender el sistema de bombeo.

2. Determine los lugares donde se medirá el tirante del caudal de excesos y defina la sección que este tiene (Circular o Baúl).
3. Determine el caudal de excesos, que pasa por el canal.
4. Mida los tirantes en las abscisas seleccionadas y regístrelos en la tabla 10.



**Imagen 27.** Canal de Excesos

**Tabla 16.**Datos del Tirante en el canal de Excesos

Caudal De Excesos	Abscisa	Tirante [cm]

### DATOS Y CALCULOS

A partir de la ecuación de Manning  $Q = \frac{A}{n} (R)^{\frac{2}{3}} (S)^{\frac{1}{2}}$  ya la sección respectiva de la abscisa seleccionada, determine el valor del tirante correspondiente al caudal transitado.

Tenga en cuenta que el canal tiene una pendiente de 6.8% y que la sección tiene un diámetro de 18 cm.

**Tabla 17. Tabla de Resultados**

<b>Caudal De Excesos</b>	<b>Abscisa</b>	<b>Tirante En El Modelo [cm]</b>	<b>Tirante Teórico[cm]</b>	<b>%Error Entre Tirantes</b>

**Parte V: Longitud de Chorro en el salto de esquí**

se determinará la distancia teórica, que recorrerá el chorro de agua en la salida del salto de esquí (cuyo comportamiento es como el lanzamiento horizontal, teniendo en cuenta que el ángulo del mismo con la horizontal es cero).

**PROCEDIMIENTO**

1. Encender el sistema de bombeo, y espere que el caudal se estabilice.
2. Determine la velocidad del Flujo en el Deflector o canal de Excesos, justo en la salida del mismo, con el fin de conocer la velocidad de salida del flujo.
3. Mida del tirante del agua, la salida del deflector.

<b>Caudal [m3/s]</b>	<b>Velocidad [m/s]</b>	<b>Tirante [m]</b>	<b>Longitud De Chorro del modelo[m]</b>

**DATOS Y CALCULOS**

A partir de la ecuación 17, determine el alcance del chorro, y compárelo con el tomado en campo. Y concluya.

**Parte VI: Control de niveles de entrada**

**Tabla 18. Datos de Diseño del Prototipo**

<b>TR</b>	<b>Qp</b>	<b>Qm</b>	<b>Hp (Vertedero)</b>	<b>Hm (Vertedero)</b>	<b>Cp</b>
<b>Años</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m</b>	<b>cm</b>	<b>m.s.n.m</b>
2.33	40	2.26	0.5	1	886.3
5	90	5.09	0.82	1.64	887.62
10	145	8.2	1.13	2.26	886.93
25	210	11.88	1.45	2.9	887.23
50	270	15.27	1.72	3.44	887.47
100	350	19.8	2.04	4.08	887.78
CPM	1500	85	5.8	11.6	891.6

**PROCEDIMIENTO**

4. Encender el sistema de bombeo.
5. Abrir la válvula de compuerta que regula el caudal en el embalse y esperar que se estabilice.
6. Una vez estabilizado el flujo, tome el valor del caudal presente.
7. Mida las respectivas alturas para completar las tablas 7 y 8.

**Tabla 19. Toma de caudales**

<b>Caudal Del modelo Qm (modelo) [l/s]</b>	
<b>Caudal Del prototipo Qp [m<sup>3</sup>/s]</b>	

**Tabla 20. Altura en la cresta del vertedero**

N o	Modelo			
	Cresta del Vertedero (m)	Altura lamina en la Cresta (m)	$\Delta H(m)$	Promedio $\Delta H$ (m)
1				
2				
3				

**Tabla 21. Tirante hidráulico en los Vertederos**

Vertedero de pared Delgada	H [m]	Caudal Teórico
Vertedero Rectangular (Tanque De Aquietamiento)		
Vertedero De Pared Delgada		
Vertedero Rectangular (Salida del cuenco)		

### DATOS Y CALCULOS

Analice los datos obtenidos en el modelo y compárelos con los datos esperados (vea la tabla 6).

**NOTA:** el vertedero (Morning Glory) se encuentra en la corta 885.8 m.s.n.m (prototipo), en el modelo 1004.01 m.s.n.m.

## BIBLIOGRAFIA

Gómez Giraldo A. Estudios y diseños del proyecto de regulación del río Tona Embalse de Bucaramanga, Memorando Técnico número 11, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia 2012.

Gavilán, German. Guía De Laboratorio De Hidráulica De Canales Abiertos. Calibración De Vertederos. P 79 a 89. 2011.

Capítulo 2, Modelación Hidráulica.

[http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_123\\_183\\_81\\_1150.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf)

[citado el 10 de julio de 2014]

PRÁCTICA II, II ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS.

[http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2\\_vertederos.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/2_vertederos.pdf) [citado el 20 de julio de

2014]

Chow, V.T. Hidráulica de Canales Abiertos, Ed. Mc Graw Hill. 1994